

ISSN 1346-7301

国総研研究報告 第72号

令和5年7月

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.72

July 2023

非住宅建築物の防火性能の高度化に資する
新しい性能指標および評価プログラムの開発

建築研究部 防火基準研究室

Development of a Performance Indicator and Evaluation Program for
Improving Fire Safety in Non-Residential Buildings

Fire Standards Division, Building Department

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

非住宅建築物の防火性能の高度化に資する新しい性能指標および評価プログラムの開発

建築研究部 防火基準研究室

Development of a Performance Indicator and Evaluation Program for Improving Fire Safety in Non-Residential Buildings

Fire Standards Division, Building Department

概要

建築物の防火性能の高度化を誘導するには、防火性能を総合的に評価・表示する仕組みが必要であるが、特に非住宅分野では整備が遅れ、建築主が防火仕様を選択する際の判断材料がないままとなっていた。そこで本研究では、非住宅建築物において高い防火性能を確保する利点を分かりやすく説明するための新しい防火性能指標およびその評価プログラムを開発した。

キーワード : 性能指標, 防火性能, 性能評価, 非住宅建築物

Synopsis

To enhance fire safety performance in buildings, it is crucial to establish a comprehensive evaluation and display system. Unfortunately, there is no such system available for non-residential buildings, leaving building owners without clear criteria to make informed decisions about fire safety measures. In response to this, we have developed a new fire safety performance indicator and evaluation program for non-residential buildings.

Key Words : Performance indicator, Fire safety performance, Performance evaluation, Non-residential building

本研究報告は、R2-4 年度事項立て課題「非住宅建築物の防火性能の高度化に資する新しい性能指標および評価プログラムの開発」の研究成果の一部を取りまとめたものである。

執筆者

防火基準研究室 室長

出口 嘉一

防火基準研究室 主任研究官

樋本 圭佑

都市防災研究室 室長

岩見 達也

((前) 防火基準研究室 室長)

(国研) 建築研究所 防火研究グループ グループ長

成瀬 友宏

((前) 防火基準研究室 室長)

(国研) 建築研究所 防火研究グループ 主任研究員

鈴木 淳一

((前) 防火基準研究室 主任研究官)

(国研) 建築研究所 防火研究グループ 主任研究員

水上 点晴

((前) 防火基準研究室 主任研究官)

目次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
(1) 工学的知見に基づく評価	
(2) 最低水準を上回る性能の評価	
1.3 研究の構成	5
2. 新しい防火性能指標の開発	7
2.1 建築物に対する防火上の要求	7
(1) 出火防止性能	
(2) 火災成長防止性能	
(3) 倒壊防止性能	
(4) 延焼防止性能	
(5) 煙制御・避難安全性能	
(6) 消防活動支援性能	
(7) 機能維持性能	
2.2 性能評価の枠組み	16
2.3 事象①：出火	19
2.4 事象②：煙進入	20
2.5 事象③：避難失敗	21
2.5.1 避難完了時間	
2.5.2 限界煙降下時間	
2.5.3 不確実要因：火災成長率	
2.6 事象④：火災発生	25
2.7 事象⑤：火災成長	26
2.7.1 統計のみから発生確率を推定できる事象	
(1) 自然鎮火	
(2) 消火活動（在館者）の有無	
(3) 消火活動（在館者）の奏功	
(4) スプリンクラー設備の作動	
(5) スプリンクラー設備の奏功	
2.7.2 消火活動（消防隊）による盛期火災への成長防止	
(1) 放水開始時間	
(2) 限界放水開始時間	

2.8 事象⑥：区画突破	32
2.8.1 延焼先との位置関係に応じた区画突破確率	
(1) 水平方向への突破	
(2) 鉛直方向への突破	
2.8.2 等価火災継続時間	
(1) 区画を構成する壁・床・扉が内部火災からの加熱を受ける場合	
(2) 火災となった区画の上階が開口噴出火炎による加熱を受ける場合	
2.8.3 不確実要因：収納可燃物密度	
2.9 事象⑦：崩壊	38
2.9.1 柱の部材限界温度	
2.9.2 梁の部材限界温度	
2.9.3 不確実要因：収納可燃物密度，基準強度，弾性係数，軸力比	
(1) 鋼材の基準強度 F および弾性係数 E	
(2) 軸力比 p およびモーメント比 q	
2.10 事象⑧：隣棟延焼	43
2.10.1 火災区画からの放射熱流束	
(1) 開口部からの加熱	
(2) 開口噴出火炎からの加熱	
2.10.2 不確実要因：外壁開口部の位置	
2.11 まとめ	49
3. 火災被害を受けた建築物の機能維持性能	53
3.1 機能維持性能の定式化	53
(1) 機能率	
(2) 区画の復旧期間	
3.1.1 火災シナリオに基づく区画の復旧期間の評価	
(1) 区画内での出火	
(2) 区画内での火災成長	
(3) 区画の突破	
3.1.2 等価火災継続時間	
3.1.3 被害率	
3.1.4 復旧期間	
3.1.5 ケーススタディ	
(1) 計算条件	
(2) 計算結果	
3.2 火災被害を受けた建築物の復旧事例の分析	68

3.2.1	復旧事例の収集	
(1)	事例収集の方法	
(2)	復旧事例の概要	
3.2.2	機能の復旧過程	
(1)	復旧シナリオ	
(2)	復旧期間	
3.3	漏煙が機能維持性に及ぼす影響：システム天井の裏側への漏煙量計測	76
3.3.1	天井埋め込み器材からの漏気量実験	
(1)	実験方法	
(2)	実験結果	
3.3.2	天井材の目地部からの漏気量実験	
(1)	実験方法	
(2)	実験結果	
3.4	漏水が機能維持性能に及ぼす影響：床面の隙間等を通じた漏水量計測	83
3.4.1	実験方法	
(1)	漏気計測の手順	
(2)	漏水計測の手順	
3.4.2	実験結果	
(1)	漏気計測	
(2)	漏水計測	
(3)	開口流量計数の比較	
3.5	まとめ	88
4.	防火性能評価のケーススタディ	93
4.1	事務所 A	93
4.1.1	計算条件	
4.1.2	計算結果	
4.2	事務所 B	100
4.2.1	計算条件	
4.2.2	計算結果	
4.3	事務所 C	109
4.3.1	計算条件	
4.3.2	計算結果	
4.4	物流倉庫 A-1, A-2	115
4.4.1	計算条件	
4.4.2	計算結果	

4.5	物流倉庫 B-1, B-2	121
4.5.1	計算条件	
4.5.2	計算結果	
4.6	物流倉庫 C	127
4.6.1	計算条件	
4.6.2	計算結果	
4.7	事務所建築物および物流倉庫建築物の比較	131
4.8	まとめ	133
5.	まとめ	135

1. はじめに

1.1 研究の背景

建築基準法は、建築物において、避難安全、倒壊防止、延焼防止等に関する諸性能が満足すべき水準を定め、火災による人的・物的被害の発生を抑止を図っている。ただし、建築基準法の要求水準は、個人の権利（財産権）を保護する観点から最低限に留められている。このため、建築基準法の要求を満足していることが、大規模な被害の発生の回避を保証するものではない。例えば、2017年2月に埼玉県三芳町の物流倉庫で発生した火災では、延床面積約7万2000平方m²のうち4万5000m²が焼損し、被害総額が121億円に及んだ[1.1]。また、被災した建築物は、解体後に建て替えられたが、火災発生から竣工までに約3年を要すなど、事業継続上の課題が露呈した[1.2]。被災した建築物は、当時の建築基準に適合していたことが確認されており[1.3]、法が定めるいわゆる最低限の安全性を保持していなかったわけではない。また、このような大規模な火災においても、死者の発生は回避されていること、近年の建物火災において、多数の死傷者を伴うような火災の発生が抑制されていることを踏まえれば、現在の法による要求水準が、その根拠となる社会全体の合意から大きく逸脱しているとは考えにくい。こうした中で、法令を遵守した建築物であっても大きな被害を免れない場合があることは、建築主自身の判断によって最低水準を上回る性能を建築物に付与し、防火性能の高度化を図ることが、特に物的被害および間接被害の大規模化を回避する上で欠かせないことを示している。

建築物の防火性能の高度化を目的とした制度には、住宅の品質向上を誘導するための「住宅性能表示制度」があり、既に普及が進んでいる。これは、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」に基づく制度であり、住宅の性能（耐震性能、防耐火性能、耐久性能、省エネルギー性能、環境性能等）に関する表示の適正化を図るための共通ルールを設け、消費者による性能の相互比較を行えるようにすることを目的としている。ただし、住宅性能表示制度は、その名称が示す通り、住宅を対象としている。非住宅については、建築物の防火性能を分かりやすく表示する制度が未整備のままで、建築主が防火仕様を選択する際の判断材料がないことが長らく課題として認識されてきた。このため、社会資本整備審議会は、建築物の質の向上に向け、特に住宅分野に比べて総合的な評価・表示・誘導体系の整備が遅れている非住宅建築物における質の向上を誘導する政策のあり方について継続して検討していく必要性を指摘している[1.4]。

非住宅建築物の性能表示を検討していくにあたっては、すでに制度化されている住宅性能表示制度の内容を参考にすることができる。同制度では、以下の観点から建築物の火災安全に関する性能を等級化している[1.5]。

- ・ 早期覚知対策：住宅から発生した火災を早く知るための感知・警報装置の設置を評価

- ・ 避難安全対策：共用廊下における二方向避難経路の確保などを評価
- ・ 緊急脱出対策：避難器具などの緊急的な脱出手段の確保を評価
- ・ 火災拡大・倒壊防止対策：住戸間の壁および床の耐火性を評価
- ・ 隣棟延焼対策：外壁，軒裏，および開口部の耐火性を評価

表 1.1 住宅性能表示制度における評価項目（火災安全に関すること）[1.5]

項	目	結 果	適用範囲
2. 火災時の安全に関する こと	2-1 感知警報装置設置 等級 (住戸火災時)	評価対象住戸において発生した火災の早期の覚知のしやすさ	戸建又は共同 各戸
		4 評価対象住戸において発生した火災のうち、すべての台所及び居室で発生した火災を早期に感知し、住戸全域にわたり警報を発するための装置が設置されている	
		3 評価対象住戸において発生した火災のうち、すべての台所及び居室で発生した火災を早期に感知し、当該室付近に警報を発するための装置が設置されている	
		2 評価対象住戸において発生した火災のうち、すべての台所及び居室等で発生した火災を感知し、当該室付近に警報を発するための装置が設置されている	
		1 評価対象住戸において発生した火災のうち、すべての寝室等で発生した火災を感知し、当該室付近に警報を発するための装置が設置されている	
	2-2 感知警報装置設置 等級 (他住戸等火災時)	評価対象住戸の同一階又は直下の階にある他住戸等において発生した火災の早期の覚知のしやすさ	共同各戸 (避難階にないもの)
		4 他住戸等において発生した火災について、当該他住戸等に火災を自動で感知するための装置が設置され、かつ、評価対象住戸に自動で警報を発するための装置が設置されている	
		3 他住戸等において発生した火災について、当該他住戸等に火災を自動で感知するための装置が設置され、かつ、評価対象住戸に手動で警報を発するための装置が設置されている	
		2 他住戸等において発生した火災について、評価対象住戸に手動で警報を発するための装置が設置されている	
		1 その他	
	2-3 避難安全対策 (他住戸等火災時・共用廊下)	評価対象住戸の同一階又は直下の階にある他住戸等における火災発生時の避難を容易とするために共用廊下に講じられた対策	共同各戸 (避難階にないもの)
		排煙形式 共用廊下の排煙の形式	
		☐ 開放型廊下 ☐ 自然排煙 ☐ 機械排煙（一般） ☐ 機械排煙（加圧式） ☐ その他	
		平面形状 避難に有効な共用廊下の平面形状	
		☐ 通常の歩行経路による二以上の方向への避難が可能 ☐ 直通階段との間に他住戸等がない ☐ その他 (結果が「その他」の場合のみ、以下の「耐火等級（避難経路の隔壁の開口部）」の結果を表示する)	
	耐火等級 (避難経路の隔壁の開口部)	避難経路の隔壁の開口部に係る火災による火災を遮る時間の長さ	
		3 火災を遮る時間が60分相当以上	
		2 火災を遮る時間が20分相当以上	
		1 その他	
	2-4 脱出対策 (火災時)	通常の歩行経路が使用できない場合の緊急的な脱出のための対策 ☐ 直通階段に直接通するバルコニー ☐ 隣戸に通するバルコニー ☐ 避難器具（ ） ☐ その他	地上階数3以上の戸建又は共同各戸
	2-5 耐火等級 (延焼のおそれのある部分（開口部）)	延焼のおそれのある部分の開口部に係る火災による火災を遮る時間の長さ	戸建又は共同
		3 火災を遮る時間が60分相当以上	
		2 火災を遮る時間が20分相当以上	
		1 その他	
	2-6 耐火等級 (延焼のおそれのある部分（開口部以外）)	延焼のおそれのある部分の外壁等（開口部以外）に係る火災による火災を遮る時間の長さ	戸建又は共同
		4 火災を遮る時間が60分相当以上	
		3 火災を遮る時間が45分相当以上	
		2 火災を遮る時間が20分相当以上	
	2-7 耐火等級 (界壁及び界床)	住戸間の界壁及び界床に係る火災による火災を遮る時間の長さ	共同各戸
		4 火災を遮る時間が60分相当以上	
		3 火災を遮る時間が45分相当以上	
		2 火災を遮る時間が20分相当以上	
		1 その他	

より詳しい評価項目の内容は表 1.1 に示す通りである。同制度では、建築物の該当する「部分の仕様」（例えば、外壁開口部の保有耐火時間）が一定の条件を満たすことを確認するといった簡単な手続きにより、建築物の等級化を行えるようになっている。こうして、性能向上の要件が明確化されていることが、必ずしも建築物の性能に精通した専門家でなくても評価を行うことを可能にし、ひいては同制度の普及につながったものと考えられる。

一方で、評価手続きの簡便さは、設計の自由度を犠牲にして成立している面があることは否めない。住宅性能表示制度における「部分の仕様」の確認は、本来であれば、それらが組み合わさることによって形成される「全体の性能」を代替的に評価しているものに他ならない。ここで、「全体の性能」と「部分の仕様」を火災安全対策の文脈の中で捉えれば、前者は「目的」、後者は「手段」に相当する。「手段」が「目的」を担保しているのであれば、「目的」を「手段」で代替することは可能である。ただし、「手段」の選択肢を絞ることは、本来であれば多様な「目的」の実現手段を制限してしまう可能性がある。例えば、表 1.1 の「2.5 耐火等級（延焼のおそれがある部分（開口部）」は、建築物の延焼防止に関する「目的」を達成するための「手段」を開口部強化に限定している。しかし、そうした「目的」であれば、例えば外壁・軒裏の強化や敷地境界までの離隔距離の確保などの条件も、「手段」の候補に挙がってもよいはずだが、現在は選択肢に含まれていない。設計自由度の向上を図るという立場からは、仕様という「手段」を制限するのではなく、むしろ性能という「目的」の到達度を評価することにし、そこに至る過程は設計者の工夫に委ねるようにする必要があるものと考えられる。

1.2 研究の目的

本研究では、物販店舗、倉庫、事務所、庁舎、病院等の非住宅建築物において、高い防火性能を確保する利点を説明するための新しい防火性能指標およびその評価プログラムの開発を行う。本評価プログラムが想定する利用者は、建築物の防火に関する知識を必ずしも持っていない建築主および設計者である。建築主および設計者は、建築物の設計における意思決定の主体およびその補助者と見なすことができる。両者が建築物の防火上の課題を正しく認識し、適切な設計仕様を選択できるようにするには、専門家ではなくても理解できるような、分かりやすい性能の表示が必要である。本研究では、どのような設計仕様を選択すれば、どのような性能の向上が見込まれるのか、設計時の検討に使えるような評価プログラムの開発を目指す。

また、前節に示したような既存制度が抱える課題を踏まえ、本研究では、以下に示す事項に留意しながら検討作業を進める。

(1) 工学的知見に基づく評価

住宅性能表示制度で採用されるような、建築物の「部分の仕様」に基づいて性能を等級付

けする方法には、比較的簡単な手続きで、建築物の性能に精通した非専門家であっても評価が行える利点がある。その一方で、「部分の仕様」がどれだけ建築物「全体の性能」を代表しているのか判断が難しく、本来であれば多様な性能向上の選択肢が制限されているといった課題がある。そこで、入力条件として与えられた「部分の仕様」を建築物の「全体の性能」に換算することで、性能の実態をより直感的に把握できるようにする。こうして、「全体の性能」を確保するための手段を設計者の判断に委ねられるようにし、設計自由度の向上を図る。

本研究では、建築物を構成する「部分の仕様」が建築物「全体の性能」に及ぼす影響を、建物火災および避難に関する工学的な知見に基づいて定量化する。同様の考え方に基いて、建築物の性能を検証するために開発された手法に、避難安全検証法[1.6]と耐火性能検証法[1.7]がある。本研究では、両検証法の考え方を参考にしながら、建築主が設計条件を検討する際に必要となる性能を網羅的に評価できるようにする。こうした工学的知見に基づく評価の利点として、評価手続きの拡張性の高さを挙げることができる。すなわち、一度整備された評価手続きが固定化されることはなく、その後の知見の蓄積に応じて随時改良を重ねていくことが可能になる。

(2) 最低水準を上回る性能の評価

新たに開発する防火性能指標は、防火性能が最低水準を上回っているのか否かといった、建築物の建築基準法への法適合性を判定するものではない。むしろ、最低水準より上位の防火性能を位置付けていくためのものであり、建築基準法による要求は踏まえつつも、防火性能の向上につながるものであれば、同法に位置付けられていない性能あるいは対策についても積極的に評価できるようなものとする必要がある。そこで本研究では、性能については機能維持性能、対策についてはソフト対策にそれぞれ着目し、防火性能指標の評価の枠組みに組み込む。

本研究では、火災による被害を受けても、なお機能を維持することができる性能、あるいは機能の喪失を抑止し、機能を喪失した部分を早期に復旧することができる性能を機能維持性能と呼ぶ。建築基準法では、防火避難上の性能を、出火防止性能、避難安全性能、倒壊防止性能、延焼防止性能、消防活動支援性能などに分類することが多く[1.8]、機能維持性能に関する議論が行われることはほとんどなかった。しかし、特に非住宅建築物においては、例えば、倉庫等はサプライチェーン維持のため、病院等は地域医療拠点維持のためといったように、火災による機能継続上の影響を回避・低減できることが重要となる。このため、機能維持の観点から防火性能を評価することは、非住宅建築物の質の差別化を図る上で有効と考えられる。

建築基準法の防火避難規定では、主に建築物の構造的・設備的仕様に基づいて火災安全を評価している。しかし、建築物の火災安全は、可燃物や火気の適切な管理、関連する設備の日常的な点検管理、あるいは火災が発生した場合の在館者の対応行動など、いわゆるソフト

対策によって大きく変化することが知られている。こうしたソフト対策のうち、防火シャッターや排煙設備などの防火・建築設備に対して定期点検の実施が義務付けられていることなどを除けば、ソフト対策は、法令において火災安全を担保するための条件として認められていない。この理由は、対策の履行を確実に担保することの難しさにあると考えられる。しかし、ソフト対策の適切な実施を促す上では、防火性能指標の評価項目として採用する意義が大きいと考えられる。

1.3 研究の構成

本報告は、以下に示す 5 章構成となっている。

- 1 章 はじめに
- 2 章 新しい防火性能指標の開発
- 3 章 火災被害を受けた建築物の機能維持性能
- 4 章 防火性能評価のケーススタディ
- 5 章 まとめ

2 章では、出火防止性能、火災成長防止性能、倒壊防止性能、延焼防止性能、避難安全性、消火活動支援性能、機能維持性能の 7 つの個別性能から構成される新しい防火性能指標を定義する。これらのうち、現時点では評価方法が定まっていない出火防止性能、消火活動支援性能、および 3 章で説明する機能維持性能を除く、4 つの個別性能の計算手続きを示す。

3 章では、7 つの個別性能のうち機能維持性能に着目し、その計算手続きを示す。また、過去に火災被害を受けた建築物の機能復旧に関する調査、火災による間接被害の大きさを左右する各種現象の模型実験など、機能維持性能の定式化にあたって考慮すべき要因について検討を加えた結果を整理する。

4 章では、2 章の計算手続きを実装したプログラムを使用してケーススタディを行う。対象は、用途および規模が異なる 6 つの建築物であり、各種防火対策が講じられた場合の性能向上効果を調べて、新たに開発した防火性能指標の特徴と課題を分析する。

参考文献

- 1.1) 日本経済新聞，2017 年 2 月 28 日，
https://www.nikkei.com/article/DGXLASDZ28HOO_Y7A220C1000000/ (2023 年 3 月確認)
- 1.2) 日本経済新聞，2020 年 2 月 12 日，
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO55531920S0A210C2L72000/> (2023 年 3 月確認)
- 1.3) 総務省消防庁：埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会報告書，2017.
- 1.4) 社会資本整備審議会：今後の住宅・建築物の省エネルギー対策のあり方（第三次答申）及び建築基準制度のあり方（第四次答申）について，2022.

- 1.5) 国土交通省住宅局住宅生産課：新築住宅の住宅性能表示制度ガイド，
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/torikumi/hinkaku/081001pamphlet-new-guide.pdf>
(2023 年 3 月確認)
- 1.6) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：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.
- 1.7) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001 年版耐火性能検証法の解説及びその計算例とその解説，井上書院，2001.
- 1.8) 辻本・遊佐・竹市：火災安全性の工学的評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，
pp.117-120，1999.

2. 新しい防火性能指標の開発

建築物に対して建築基準法が要求する防火性能は、生命保護等の観点から必要とみなされる最低限の水準に留められている。このため同法を遵守することは、必ずしも大きな火災被害の発生防止を保証しない。より高度な性能への誘導には、性能を数量的に表示する枠組みの利用が欠かせない [2.1-2.4]。こうした枠組みでは、評価項目ごとの条件適合度をチェックシート評価方式または段階評価方式で評価し、その結果を集約して建築物の性能指標に換算することが多かった。こうした方式による評価手続きは簡便である一方で、評価項目同士の関連性が曖昧で、評価軸の数量化や評価結果の解釈が難しいといった課題も抱えている。そこで本研究では、総合的なリスク評価を活用することにより、防火性能指標を合理化する方法について検討する。

2.1 建築物に対する防火上の要求

新しい防火性能指標によって高度な防火性能を位置付けていくにあたっては、建築物のどのような防火上の特徴を評価すべきかを整理しておく必要があるが、建築基準法で要求される項目を評価できるようにするだけでは十分ではない。建築基準法は最低限の基準であるため、建築物が「備えておくべき火災安全上の要件」は記されていても、より高度な防火性能を位置付けるために必要な「備えておくことが望ましい火災安全上の要件」を網羅している訳ではないためである。「備えておくことが望ましい火災安全上の要件」を含めた広義の火災安全上の要件は、防火設計者らの間で経験的に認知されているものが多いが、近年になって学会刊行物の形でまとめられ、広く共有されるに至っている [2.5-2.7]。本研究では、これらの要件を、建築物の防火性能を構成する個別の性能（以下、個別性能）に紐付けることで、広義の火災安全上の要件の全体像を整理することを試みる。

建築物の防火性能を構成する個別性能は、過去に提案された防火性能評価の枠組みの中で様々な形で分類されてきた。例えば、防災計画書の作成手引きとして作成された指針では、建築物に対する要求を、出火防止、早期覚知（発見、感知、警報、報知）、初期展炎防止・初期消火、居室（区画）避難、拡大延焼防止、避難・安全（建物全体）、崩壊防止・再使用、救助・本格消火、外部からの類焼防止の9つの個別性能に分けて検討している [2.8]。また、1993年から1998年にかけて行われた建設省総合技術開発プロジェクトでは、防火上備えておくべき個別性能として、日常火気による出火を防止できること、火災の危険性から安全に逃げられること、建築物の一部／全部が崩壊しないこと、消防活動を容易に行えること、容易に延焼しないことの5つを挙げている [2.9]。一つで複数の要件を対象としている個別性能もあるため、個別性能は数が多いほどより網羅的であるという訳ではない。こういった個

別性能を掲げるのかは、当該評価において重視される要件の扱いやすさ、同じくシナリオの設定のしやすさ、あるいは評価結果の解釈のしやすさなどの観点から判断されるべきである。本研究では、以上のような点を考慮して、建築物に対して要求される防火上の性能を以下に示す 7 つの個別性能に分類する。

- (1) 出火防止性能
- (2) 火災成長防止性能
- (3) 倒壊防止性能
- (4) 延焼防止性能
- (5) 煙制御・避難安全性能
- (6) 消防活動支援性能
- (7) 機能維持性能

これら 7 つの個別性能に、広義の火災安全上の要件 [2.5-2.7] を紐付けるにあたっては、性能規定型の技術基準の構成原理を説明するために利用されることの多い NKB5 レベルの概念を利用する。NKB5 レベルは、北欧 5 か国が域内市場の統一のために設置した NKB（ノルディック建設委員会）により 1955 年に提示された概念で、それ以前は各国で独自に行われてきた規制の調和を目指して、各国の法令の構成をいくつかの階層に分けて整理したものである [2.10]。これを国内の建築基準法令に対応付けたものが図 2.1 である。最上層である第一階層は法令の目的が掲げられており、建築基準法の法体系では法第 1 条に相当する。第二階層では、第一階層の目的を達成するために建築物が備えるべき機能上の要件が記されており、建築基準法のその他の各条に相当する。第三階層では、各機能に要求される性能が、定性的あるいは定量的な表現をとって記されており、政令に相当する。最下層である第四階層は 2 つの部分に分かれており、第三階層に示された性能要求を設計が満足していることを検証するための工学的計算方法や試験方法、または具体的な解決方法が記されているもので、告示に相当する。

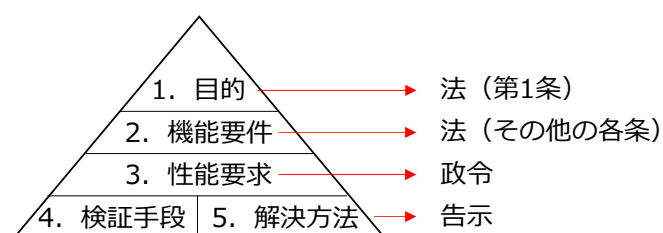


図 2.1 NKB5 レベルと国内の建築基準法令の対応

(1) 出火防止性能

表 2.1 は、建築物の出火防止を実現するための要件を整理したものである。出火防止の機能要件は、「A 日常的火気による火災の発生防止」、「B 放火による火災の発生防止」、「C 危

危険物による火災の発生防止」に分けられる。

このうち A の性能要件は「日常的火気からの容易な着火の防止」に集約され、その解決方法が 3 項目に分類されている。最も基本的な考え方が「日常的火気の周辺での容易に着火する材料の仕様制限」と「建築物の各部位の日常的火気からの離隔距離の確保」の 2 つであり、現行法令においても、火気使用室を指定してその内部で使用可能な内装の仕様を制限したり、火気から一定の距離をとることを求めたりしている。「日常的火気器具の管理のしやすさの確保」は、日常的火気器具が適切に使用されるために建築物側で採り得る解決方法を示しており、具体例として見通しの良い平面計画の確保が挙げられている。

B の観点に基づく性能は、現在の法令で要求されていないが、全ての火災のうち放火による火災の割合は大きく、大きな被害を伴う放火火災も発生している。例えば、2019 年に京都市伏見区のアニメ制作会社で発生し、36 名の死者を出した火災は、同社に恨みを持つ者による犯行であったとされる [2.11]。2021 年に大阪市北区の雑居ビルで発生し、27 名の死者を出した火災は、出火元となった 4 階クリニックの元患者による犯行であったとされる [2.12]。ただし、A の場合とは異なり、B の場合には火災の発生箇所を事前に絞り込むことが困難であり、内装制限や離隔距離の確保といった場所に依存する解決方法を採用することが常に有効であるとは限らない。このため、放火を抑止する建築的対策の選択肢は必ずしも多くないが、人目がつきにくい建築物の外周部が放火犯に狙われやすいとされることを考慮すれば、死角の少ない敷地内配置計画とすることなどは、対策として有効と考えられる。

C の性能要件は、「危険物の排除」、「火災時の一般居室への影響の排除」、「火災時の他の建築物への影響の排除」に分けられる。危険物による火災は、日常的火気による火災に比べて火源の規模が大きくなる可能性が高いことから、排除することを基本とし、仮に貯蔵の

表 2.1 出火防止に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	日常的火気による火災の発生防止	日常的火気からの容易な着火の防止	日常的火気の周辺での容易に着火する材料の使用制限	・火気制限 ・内装制限
			建築物の各部位の日常的火気からの離隔距離の確保	・離隔距離
			日常的火気器具の管理のしやすさの確保	・平面計画（可視性）
B	放火による火災の発生防止	放火による火源からの容易な着火の防止	火災発生を発見しやすい空間の確保	・敷地配置計画（可視性）
C	危険物による火災の発生防止	危険物の排除	危険物の持ち込み制限	・用途規制 ・管理計画
		火災時の一般居室への影響の排除	危険物の一般居室からの隔離	・貯蔵装置 ・離隔距離
		火災時の他の建築物への影響の排除	危険物の敷地境界からの隔離	・離隔距離

必要がある場合であっても、数量を制限したり、一般居室や他の建築物からは隔離したりするなどの対応が求められる。

(2) 火災成長防止性能

表 2.2 は、建築物内部で出火した後の火災成長防止を実現するための要件を整理したものである。火災成長防止の機能要件は、「A 日常的火気による火災成長防止」と「B 放火による火災の成長防止」に分けられる。

このうち A の性能要件は、「火災発生の早期発見」、「火災発生後の早期の消火」、「着火後の容易な火災成長の防止」に分けられる。このうち、「火災発生の早期発見」では、感知・警報設備の設置に加え、見通しの良い平面計画の必要性を挙げてある。また、「火災発生後の早期の消火」では、在館者が利用可能な消火・散水設備の設置に加え、在館者による消火活動の有効性を向上させるための消防・防災計画の策定や、定期的な消防訓練の実施を挙げてある。「着火後の容易な火災成長の防止」は、上記のような在館者による対応とは対照的に、出火室内の内装材料や収納可燃物量を制限している。

B の性能要件は、A のそれに一致している。基本的な考え方に差異はないが、放火は建築物の外周部で発生することが少なくないため、「火災発生の早期発見」の観点からは、死角の少ない敷地内配置計画となっていることが望ましい。なお、放火火災は建築物の内部で発生することもあるが、この場合の火災成長防止に関する要求の解決方法は「A 日常的火気による火災成長防止」のそれに一致する。ただし、放火により生じる火源の規模は、日常的

表 2.2 火災成長防止に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	日常的火気による火災の成長防止	火災発生の早期発見	火災発生を早期に発見する手段の確保	・感知・警報設備
			火災発生を発見しやすい空間の確保	・平面計画（可視性）
		火災発生後の早期の消火	在館者が利用可能な消火設備の確保	・消火・散水設備
			在館者が不在であっても稼働する散水設備の確保	
		着火後の容易な火災成長の防止	効果的な消防活動 急激な火災拡大の防止	・消防・防災計画／消防訓練 ・内装制限（防災製品） ・用途制限
B	放火による火災の成長防止	火災発生の早期発見	火災発生を早期に発見する手段の確保	・感知・警報設備
			火災発生を発見しやすい空間の確保	・敷地配置計画（可視性）
		火災発生時の早期の消火	効果的な消防活動を行うための消防計画の策定および定期的な消防訓練の実施	・消火・散水設備 ・消防・防災計画／消防訓練

火気によるそれに比べて大きくなる場合が多いと考えれば、その要求水準はより高くなるべきである。

(3) 倒壊防止性能

表 2.3 は、建築物の火災に伴う倒壊を防止するための要求を整理したものである。機能要件の数は「建築物内の人命安全、財産保全、および機能維持、ならびに他の建築物に影響を及ぼす倒壊の防止」の 1 つのみであり、他の要求に比べて少ない。ただし、例えば性能要件における「建築物の倒壊防止」では、解決方法として「耐力部材の変形抑制」が求められる。これを実現するための水準は、建築物の規模、用途、立地に加え、当該部材が使用される部位によっても異なるため、具体的な仕様の種類は多岐にわたる。

機能要件に掲げられる「人命安全、財産保全、および機能維持」は、建築主および利用者の直接的な利益につながるものであり、設計時に、法による要求水準を上回る性能を付与することへの動機付けになりうるものと考えられる。一方の「他の建築物」に対する影響の抑制は、建築主および利用者にとって直接的な利益とは捉えにくい部分があるが、周辺に対する被害の拡大防止を通じて、公共の利益につながっている。このため、「他の建築物」に対する影響の抑制については、行政による誘導施策などにより、より高度な性能を付与することに対する誘因の提供が有効と考えられる。

表 2.3 倒壊防止に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	建築物内の人命安全、財産保全、および機能維持、ならびに他の建築物に影響を及ぼす倒壊の防止	火災外力の制限	火災継続時間・激しさの抑制	・用途制限 ・規模制限
			火災規模の制限	・防火区画 ・消火散水設備
		建築物の倒壊防止	耐力部材の変形抑制	・耐力部材強化
		倒壊時の影響範囲の制限	落下物からの安全確保	・部材使用制限
			他の建築物への衝突回避	・規模制限 ・離隔距離

(4) 延焼防止性能

表 2.4 は、建築物の内部および他の建築物との間の延焼を防止するための要求を整理したものである。機能要件は「A 同一建築物内の他の空間との間の延焼の防止」と「B 他の建築物との間の延焼の防止」に分かれている。

このうち A は、一つの建築物が複数の用途によって分かれて管理されている場合や、地下通路などによって複数の空間が接続される場合に、所有者が管理する空間で火災が発生し、その影響が他の所有者の管理する空間に及ぶ状況を想定している。すなわち、自らの火災が管理区分外に害を及ぼさないことを目的としており、必ずしも同じ管理区分内の延焼

防止を目的とするものではない。同じ管理区分内の延焼防止については、名目上、消防活動支援性能および倒壊防止性能を確保するための要件として位置付けられている。ただし、火災の延焼拡大を防止するという現象上の役割は一致しているので、性能要件および解決方法には共通している部分が多い。

また B および C は、独立した建築物が複数存在する場合に、自らの火災が周辺の他の建築物に害を及ぼす状況（加害防止）および周辺の火災によって自らが害を被る状況（受害防止）を想定している。上記 A で想定する延焼過程は、主に形成する界壁が突破されることで室間の延焼が起こることを想定しているが、B および C では屋外に噴出した火炎や火の粉による延焼を防止する必要がある、求められる性能要件およびその解決方法に差異がある。なお、機能要件 B は、他の建築物に対する加害防止を掲げるものであり、建築主および利用者にとって、法による要求水準を上回る性能を付与することへの動機付けになりにくい場合がある。このため、より高度な性能の選択を促す観点からは、倒壊防止性能の場合と同様、行政による誘導施策の活用が必要である。

表 2.4 延焼防止に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	同一建築物内の他の空間との間の延焼の防止	火災外力の制限	火災継続時間・激しさの抑制	・用途制限 ・規模制限
			防火区画の形成	・防火区画 ・消火散水設備
		同一階延焼の防止	界壁による延焼の防止	・防火区画（異種用途） ・部材への耐火要求
		上階延焼の防止	堅穴を通じた延焼の防止	・堅穴区画 ・特別避難階段
			外壁開口部を通じた延焼の防止	・開口部・外壁面制限 ・ドレンチャー設備 ・離隔距離
B	他の建築物との間の延焼の防止（加害防止）	火災外力の制限	火災継続時間・激しさの抑制	・用途制限 ・規模制限
			火災規模の制限	・防火区画 ・消火散水設備
		火炎による延焼の防止	屋外に噴出する火炎の抑制	・開口部制限 ・防火区画
		火の粉による延焼の防止	火の粉の発生抑制	・規模制限 ・用途制限 ・屋根面強化
C	他の建築物との間の延焼の防止（受害防止）	火炎による延焼の防止	屋外に噴出する火炎による着火の防止	・開口部制限（防火設備） ・離隔距離
		火の粉による延焼の防止	火の粉による着火の防止	・屋根不燃化

(5) 煙制御・避難安全性能

表 2.5 は、火災時における煙制御および在館者の避難安全を実現するための要件を整理し

たものである。煙制御の機能要件は「A 煙拡散の制御」に集約される。避難安全の機能要件は、「B 安全な避難場所の確保」と「C 避難場所への経路の確保」に分けられる。

このうち A の性能要件は、「着火後の急激な煙降下の防止」と「煙の拡散範囲の限定」に分けられている。前者は、在館者が避難に利用できる時間の最大化を図るものであり、この解決方法として「急激な火災拡大の防止」と「屋外への速やかな煙の排出」が挙げられている。一方、後者の解決方法として、「出火室・出火階への封じ込め」と「避難経路の防護」を挙げている。

B の性能要件は「一時避難場所での安全の確保」と「最終避難場所での安全の確保」に分けられる。一時避難場所は、火災時であっても建築物内に安全に滞在することができる空間で、在館者が多い高層建築物や、避難時要介護者が在館する病院などで確保が求められる。最終避難場所には、公道等に接続した敷地内空地などが想定される。最終避難場所は、建築

表 2.5 煙制御・避難安全に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	煙拡散の制御	着火後の急激な煙降下の防止	急激な火災拡大の防止	・内装制限（防災製品） ・用途制限
			屋外への速やかな煙の排出	・排煙設備
		煙の拡散範囲の限定	出火室・出火階への封じ込め	・防煙区画 ・堅穴（漏煙防止、加圧防煙） ・扉の開閉障害防止
			避難経路の防護	・安全区画 ・加圧防煙 ・避難階段／特別避難階段
A	安全な避難場所の確保	一時避難場所での安全の確保	火災の影響からの隔離	・籠城区画／中間避難階
			十分な滞在容量の確保	
			地上との連絡手段の確保	・情報伝達設備
		最終避難場所での安全の確保	火災の影響からの隔離	・敷地内空地 ・公道等への接続 ・敷地内通路
			十分な滞在容量の確保	
			避難後の自由な行動の確保	
B	避難場所への経路の確保	避難場所への迅速な到達	早期の火災発見と情報伝達	・感知・警報設備 ・平面計画（可視性）
			連続かつ明快な避難経路の確保	・二方向避難経路 ・重複歩行距離制限 ・避難経路上の障害物除去 ・平面計画（可視性）
			十分な通過容量の確保	・通路幅／出口幅
			適切な避難誘導・介助の担保	・非常用照明・誘導装置 ・消防・防災計画／消防訓練
		避難場所への安全な到達	避難経路の安全の確保	・安全区画 ・加圧防煙 ・避難階段／特別避難階段
			全ての在館者に対して少なくとも一つの避難経路の確保	・二方向避難経路
			逃げ遅れ時の脱出手段の確保	・避難器具

物の出口周辺に避難者が滞留しないだけの十分な広さが求められる。また、最終避難場所に到達した後は、火災による火熱や煙、あるいは火災に伴う落下物などからの安全が確保されている必要がある。

C の性能要件は、「避難場所への迅速な到達」と「避難場所への安全な到達」に分けられる。解決方法には、安全区画の形成や加圧防排煙設備の導入のように、避難経路の安全性を物理的に確保することを目的とするものの他に、避難経路確保の不確実性を減らすための二方向避難経路の確保や、避難経路および避難階段の配置の偏りを予防するための重複歩行距離の制限など、在館者の円滑な避難行動を担保するための平面計画上の要求もある。また、在館者が火災の発生を早期に発見し、適切な避難経路を選択するには、見通しの良い平面計画を確保することの重要性が認識されているが、現行法令による要求は設けられていない。

(6) 消防活動支援性能

表 2.6 は、消防活動を支援するための要件を整理したものである。機能要件は、「A 消防活動等のための拠点の確保」、「B 消防活動等のための拠点への経路の確保」、「C 消防活動等のための手段の確保」、「D 制御不能な状態となることを回避するための火災規模の制限」の 4 つに分かれている。他の個別性能が、当該建築物そのもの、内部に収納された財物、あるいは在館者の安全を確保することを目的としているのに対し、この個別性能は唯一消防隊の安全を確保し、その活動を支援することを目的としている。ただし、消防活動支援性能

表 2.6 消防活動支援に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	消防活動等のための拠点の確保	拠点からの活動有効性の確保	消防活動拠点の設置	・避難階段／特別避難階段 ・加圧防煙 ・防火区画
		拠点内での安全（性能）の確保		
B	消防活動等のための拠点への経路の確保	拠点への迅速な到達・退避	建物外（敷地内）の移動経路の確保	・敷地内通路
			建物内への進入口の確保	・非常用進入口／代替進入口
			建物内の移動経路・手段の確保	・非常用エレベーター
		拠点への安全な到達・退避	移動経路の安全の確保	・非常用エレベーター
C	消防活動等のための手段の確保	消火活動の活動有効性の確保	消火活動の用に供する設備の設置	・消火散水設備 ・感知警報設備 ・避難排煙設備 ・非常用電源・通信設備 ・防災センター・中央管理室
		検索・救助活動の活動有効性の確保	検索・救助の用に供する設備の設置	
D	制御不能な状態となることを回避するための火災規模の制限	火災外力の制限	防火区画の形成	・防火区画 ・消火散水設備
		隣接する区画および建築物への延焼防止		

を強化することにより消防隊が円滑に消防活動を行えるようになれば、火災被害を小さく抑えることができるようになるため、結果的に建築主の利益に通じるという点で他の個別性能と異なっているわけではない。

このうち A, B は、消防隊の建築物内での安全な空間確保という点で、避難安全のための機能要件と目的が類似しているが、屋外から屋内へのアクセスを重視している点が異なっている。

また、C の「消防活動等のための手段の確保」は、火災の勢いを積極的に抑制することを目的とするものであり、他の個別性能を実現するための要件に比べて設備に対する依存度が高い。

D の「制御不能な状態となることを回避するための火災規模の制限」は、こうした積極的な抑制が奏功しなかった場合であっても被害を極限化することを目的としており、抑制手段の冗長性を確保する役割を担っている。

(7) 機能維持性能

表 2.7 は、火災が発生した建築物の機能維持を実現するための要求を整理したものである。機能要件は、「A 機能停止・喪失の回避」、「B 機能代替手段の確保」、「C 機能復旧手段の確保」に分かれている。機能維持の手段の中には、火災によって被害を受けた建築物の機能を別の場所にある建築物によって代替させる方法がある。しかし、これは建築物そのものの個別性能の議論からは逸脱することから、火災が発生した建築物内あるいは同じ敷地内

表 2.7 機能維持に関する要求

	2. 機能要件	3. 性能要件	5. 解決方法	
			項目	具体例
A	機能停止・喪失の回避	火災の影響の拡大防止	火煙の影響の閉じ込め	・防煙区画／防火区画
		火災の影響からの基幹的な機能の保護	放水・散水による影響の軽減	・基幹機能隔離 ・防水区画
			基幹的な機能を担う空間の防御	・基幹機能隔離 ・防煙区画／防火区画
B	機能代替手段の確保	有効な機能代替手段の確保	業務遂行に必要となる空間資源の確保	・平面計画（冗長性・可変性）
			業務遂行に必要となるその他の資源の確保	・保護・防御 ・分散管理 ・保険
		迅速な機能代替手段の確保	機能代替に利用可能な資源の迅速な確保	・機能維持計画（資源調達） ・機能分散
C	機能復旧手段の確保	有効な機能復旧手段の確保	業務遂行に必要となるその他の資源の確保	・保護・防御 ・分散管理 ・保険
		迅速な機能復旧手段の確保	被災空間の迅速な復旧	・部材強化 ・施工性向上
			機能復旧に利用可能なその他の資源の迅速な確保	・機能維持計画（資源調達）

で機能代替または機能復旧が図られることを想定している。

建築基準法では火災後の機能維持を明示的に求めているわけではない。しかし、特に A に関する解決方法は、例えば、防煙区画・防火区画の形成などのように、異なる目的のために建築基準法により要求され、結果的に機能維持に貢献しているものもある。一方で、機能維持の観点からは、建築物を機能させるために必要な設備等を、焼損だけでなく、煙による汚損および放水・散水による水損からも防御する必要があるため、建築基準法の下での火災拡大防止とは異なる観点からの火災制御が必要になる場合がある。

B および C に関する解決方法は、建築基準法の要求内容とは重複しないものが少なくない。例えば、「平面計画（冗長性・可変性）」は、火災被害を受けた室の機能を別の室で代替できるだけの平面計画の冗長性・可変性が確保されていることを指している。また、建築物そのものに備わる防火上の機能だけではなく、人材、装置、資材、情報、資金等といった、それ以外の「業務遂行に必要となるその他の資源の確保」が必要になる点は、他の個別性能に関する要求とは異なる。

2.2 性能評価の枠組み

建築物の防火性能を評価する既存の枠組みでは、評価項目ごとの条件適合度をチェックシート評価方式または段階評価方式で評価し、その結果を集約して建築物の性能指標に換算することが多かった [2.1-2.4]。こうした評価方式が広く採用されてきた背景には、エキスパートジャッジメント等に基づいて評価項目の重み付け係数を決定することにより、各種建築仕様の防火上の効果を、経験的な知見と齟齬のない形で評価できる点が重視されたものと考えられる。また、建築仕様の中には、防火上の効果を評価するための定式化の方法が確立していない場合があり、幅広い対象の評価を行うには、こうした評価方式の採用が有効であったものと考えられる。一方で、チェックシート方式／段階評価方式では評価項目同士の関係性が明示的に定式化されないため、例えば、延焼防止過程において、建築物の内部

表 2.8 チェックシート方式／段階評価方式とリスク評価方式の特徴の比較

	チェックシート方式／段階評価方式	リスク評価方式
利点	- エキスパートジャッジメントの採用により、リスク評価方式では評価が難しいような対象も含めた網羅的な設計仕様の評価が可能 - 評価項目に重み付け係数を乗じるなどの比較的簡単な評価手続きを採用	- 評価の論理構造が明快で、結果の解釈が容易 - 代替性(ある性能の不足を別の性能で補うこと)の評価や、評価結果の相対化（例えば建築基準法相当の性能との比較）が可能 - 将来的な知見の整備に応じて段階的に評価項目・方法を拡張可能
欠点	- 評価項目同士の関係性が曖昧で、対策の代替性の評価が難しい - エキスパートジャッジメントへの依存度が大きく、拡張時には重み付け係数の再調整が必要	- 評価項目によっては定式化の方法が未確立、あるいは技術的な裏付けが不十分な場合がある - 物理的な定式化を採用することで評価手続きが複雑になりやすい

構造を木質化することによる性能の低下を許容しつつも、外周構造を強化することでそれを補うといったような、対策代替性の評価が難しいといった評価構造上の課題を抱えている。また、評価項目の重み付け係数が一度決定されてしまえば、新たな評価項目を簡単に追加することができないといった拡張性に関する課題を抱えている。こうした課題を解消する評価方式の一つとして、リスク評価方式が挙げられる。リスク評価方式は、ある建築仕様の下で起こりうる事象の発生確率とその事象がもたらす影響の大きさを考慮することで、確率的に建築物の防火性能を評価する方式である。チェックシート方式／段階評価方式に比べて評価の論理構造が明快なため、評価結果の解釈が容易であるほか、上記の対策代替性の評価や、評価方式の段階的な拡張に関する課題を解消することができる。ただし、評価項目によっては、評価のための定式化の方法が確立していない場合がある上、論理構造を重視するために評価手続きが複雑になりやすいといった問題も抱えている。表 2.8 は、チェックシート方式／段階評価方式とリスク評価方式の特徴を比較したものである。いずれの評価方式にも一長一短があるが、近年、防火分野におけるリスク評価の研究が進展し、利用環境が整備されつつあることを踏まえ、本研究ではリスク評価方式に基づいて防火性能評価の枠組みを構築することとする。ただし、従来のリスク評価の枠組みでは、特定の個別性能を対象とすることが一般的であった。すなわち、個々の個別性能の評価に適した想定火災シナリオの下、設計火源に対する建築物あるいは在館者の安全が確保されていることをもって

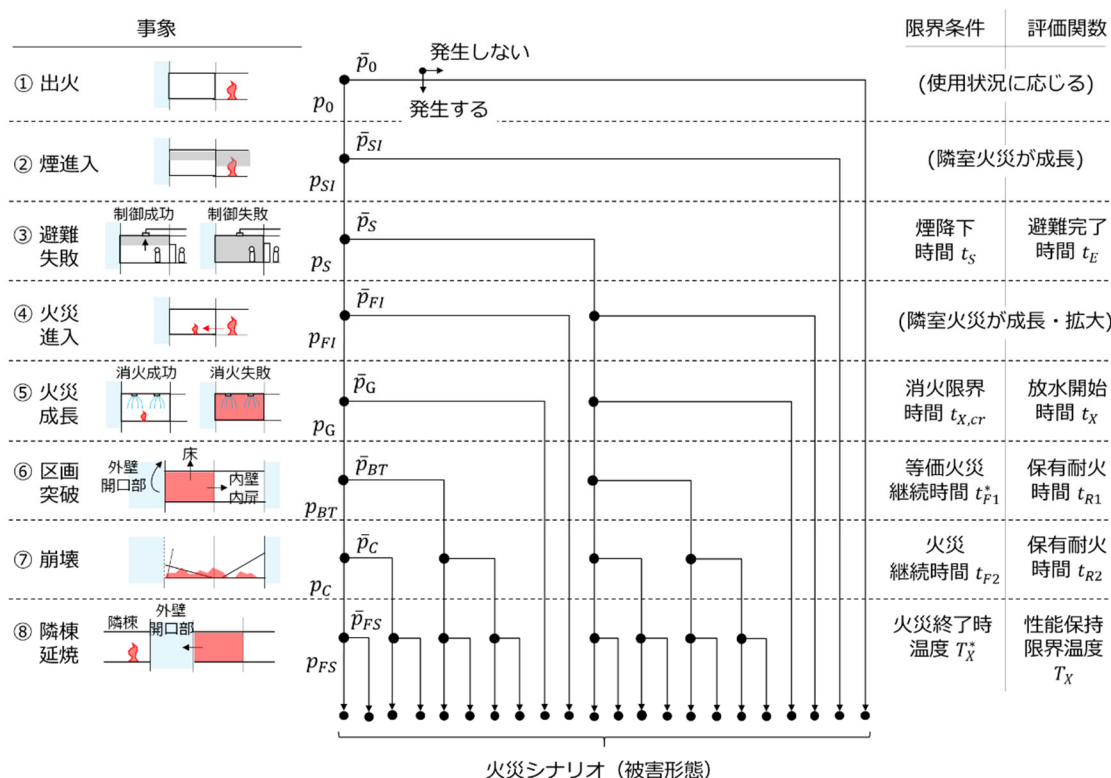


図 2.2 総合的なリスク評価の枠組み

性能の有無を確認してきた。これに対し、本研究では、個別性能ごとに想定火災シナリオを設けるのではなく、出火から被害発生に至るまでの火災の進展過程を追跡し、その中で個別性能の達成に寄与する各種防火対策の役割を確率的に評価する。すなわち、単一の火源から派生的に生じうる被害形態を網羅的に評価した上で、その結果を関連する個別性能の評価に反映させる方式を採用する。このように単一の火源の下での結果を利用できるようにすることで、個別性能同士の位置付けの相対化が可能となる。

本研究で想定する被害発生イベントツリーを図 2.2 に示す。ここでは、建築物が、一定の煙拡散防止上、延焼防止上の性能を有する複数の区画から構成されるものとみなす。すなわち、区画で生じる被害が他の区画から独立していると仮定し、建築物を構成する区画の一つで生じうる火災シナリオを、8つの確率的事象（①出火、②煙進入、③煙制御・避難失敗、④火災進入、⑤火災成長、⑥区画突破、⑦崩壊、⑧隣棟延焼）の組み合わせにより、22通りに分類している。ただし、隣接する区画からの煙の進入は、隣接する区画において火災が成長した場合に、また、同じく火災の進入は、さらに界壁が突破された場合にそれぞれ生じると考えることで、建築物内部で発生した火災の影響の拡大を評価できるようにする。イベントツリーの各事象の発生確率は、基本的に、事象の発生の有無を判定するための限界条件と、その尺度となる評価関数の大小関係に応じて評価する。当該区画の防火上の特徴は、評価関数にその効果を導入することで反映させることができる。

本研究では、前節に掲げた7つの個別性能に着目して建築物の防火性能を評価する。これらを適切な被害指標 L （被害量または被害発生確率）に結びつけることで、リスク評価の結果を個別性能の評価に利用できるようにする。一般に、被害指標 L は個別性能の逆指標となる。そこで、次に示すように、被害量 L の逆数を基準条件における被害量 L_0 の逆数で正規化した値を性能指標 F として定義する。

$$F_i = \frac{1/L_i}{1/L_{0,i}} \quad (i = 1, \dots, 7) \quad (2.1)$$

基準条件の与え方には任意性があるが、例えば、建築基準法により要求される水準と同程度とすれば、追加的な防火対策を講じることによる性能向上を分かりやすく評価できるようになる。表 2.9 には、各目標性能の評価に適した被害指標 L の例を挙げている。被害指標 L の

表 2.9 各個別性能における被害指標の例

目標性能	F 値	被害指標 L の例
出火防止性能	F_1	出火確率
火災成長防止性能	F_2	火災成長確率
倒壊防止性能	F_3	崩壊部分面積、崩壊確率
延焼防止性能	F_4	延焼棟数、延焼確率
避難安全性能	F_5	避難不能者数、避難失敗確率
消防活動支援性能	F_6	消火失敗確率
機能継続性能	F_7	改修工事費、復旧日数

多くは、イベントツリーの各事象の発生確率を計算する過程で得られるものが多いが、例えば、機能維持性能の改修工事費や復旧日数などについては、次章で説明する追加的なモデル化が必要となる。次節以降でイベントツリーの各事象の発生確率のモデル化を行う。

2.3 事象①：出火

着目する区画での火災の発生は、当該区画において最初に火災が発生する場合と、他の区画で出火した火災が内部延焼により当該区画に至る場合に分けて考えることができる。ここでは、前者を「出火」（事象①）、前者および後者を「火災発生」（事象④）として、呼称を使い分ける。

一般に、建築物の火災リスク評価では、ある1件の火災によって引き起こされる損失の大きさをリスクとみなし、リスク評価に反映される各種防火対策の効果を検討する場合が多い。これは、個別の防火対策の効果を検討する上では有効であるが、本来であれば、用途、規模、建築物内部の部分などによって変わる出火確率を無視しており、建築物としての性能を議論する上では適切ではない。そこで本研究では、建築物の内部で発生する単位年、単位面積あたりの火災件数を出火確率 p_0 と定義し、その影響を加味した評価を行う。ある用途 k の建築物の出火確率 $p_{0,k}$ は、一年間あたりに発生した総火災件数 $n_{f,k}$ を、同用途の建築物の総延床面積 $\sum A_{floor,k}$ で除すことにより、次式に示すように計算することができる。

$$P_{0,k} = \frac{n_{f,k}}{\sum A_{floor,k}} = \frac{n_{f,k}}{N_k \times \bar{A}_{floor,k}} \quad (\text{件}/(\text{年} \cdot \text{m}^2)) \quad (2.2)$$

総火災件数 $n_{f,k}$ および総延床面積 $\sum A_{floor,k}$ は統計的に求めるべき値であるが、 $\sum A_{floor,k}$ を直接扱っている統計はないことから、用途 k の総建築物数 N_k にその平均延床面積 $\bar{A}_{floor,k}$ を乗じることによって $\sum A_{floor,k}$ を推定する。このうち、 $n_{f,k}$ は火災報告（総務省消防庁）より、 N_k は固定資産の価格等の概要調書（総務省）より、建築着工統計調査、住宅着工統計調査（国土交通省）より、 $\bar{A}_{ave,k}$ は建築着工統計調査、住宅着工統計調査（国土交通省）より、それぞれ求めることができる。戸建住宅、共同住宅、事務所、店舗、工場、倉庫、病院、旅館・ホテル、学校の9用途の建築物について、 $p_{0,k}$ を推定した結果を図2.3および表2.10に示す[2.13]。

なお、図2.2に示したイベントツリーでは、区画単位の火災拡大を評価することとしており、出火についても、建築物全体ではなく、ある区画 i の出火確率 $P_{0,i}$ を評価する必要がある。ある区画 i の出火確率 $P_{0,i}$ は、その用途や規模などによっても左右されると考えられるが、ここでは規模の影響のみを考慮することとし、次のように計算する。

$$P_{0,i} = P_{0,k} A_{floor,i} \quad (\text{件}/\text{年}) \quad (2.3)$$

ただし、 $A_{floor,i}$ は区画 i の床面積である。

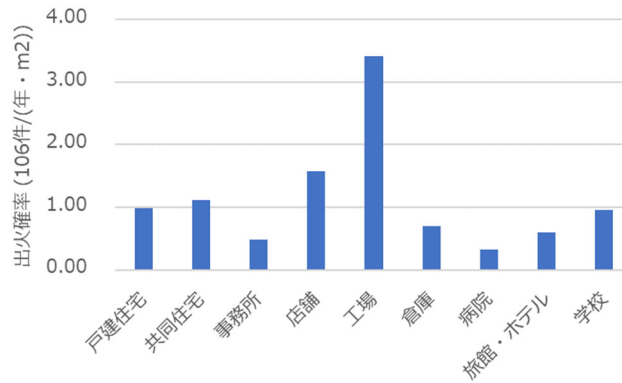


図 2.3 建築物の用途ごとの出火確率 [2.13]

表 2.10 建築物の用途ごとの出火確率 [2.13]

用途	出火確率 (件/(年・m²))
戸建住宅	0.981
共同住宅	1.112
事務所	0.487
店舗	1.581
工場	3.409
倉庫	0.695
病院	0.332
旅館・ホテル	0.592
学校	0.951

2.4 事象②：煙進入

区画*i*への在館者の避難を要するような煙の進入は、当該区画内で出火するか、または隣接する区画（一次隣接区画）で出火した火災が成長することによって生じるものとする。図 2.4 は、建築物の内部で出火した火災のうち、区画*i*に煙が進入するシナリオを特定するためのイベントツリーである。区画*i*への煙の進入は、さらに離れた区画で火災が発生した場合であっても起こりうるが、個々の区画には煙の拡散を防止する性能が一定程度備わっていることを考慮し、その影響を無視しうるものとする（2.2 節で導入した仮定参照）。なお、図 2.4 には、説明の重複を避けるために、区画*i*で火災が発生するシナリオを特定するための分岐も含まれている（事象④）。図 2.4 のイベントツリーに従えば、区画*i*で煙進入が発生する確率 p_{SI} は $p_{0,i} + \sum_{j=1}^{M_i} p_{0,j} p_{FO,j}$ となるが、総合的なリスク評価の枠組みの下での p_{SI} は当該建築物の出火確率 p_0 の条件付き確率となることから、 $p_{SI,i}$ は次のように表される。

$$p_{SI,i} = \frac{p_{0,i} + \sum_{j=1}^{M_i} p_{0,j} p_{FO,j}}{\sum_{n=1}^N p_{0,n}} \quad (2.4)$$

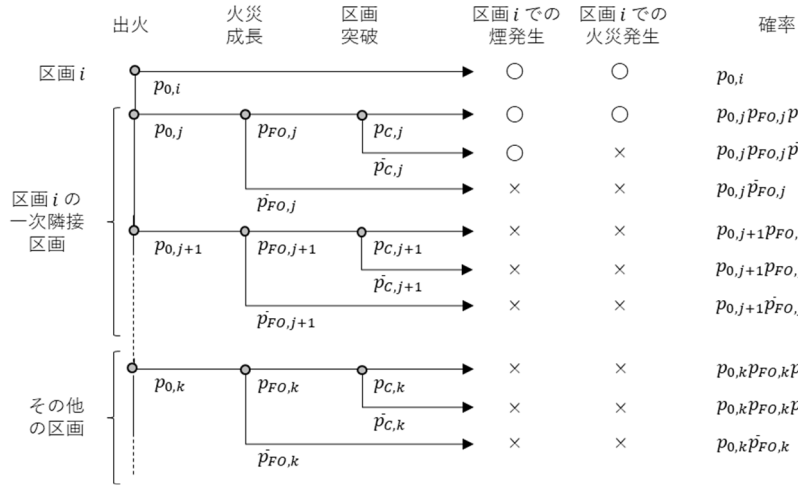


図 2.4 区画iで煙が進入または火災が発生する確率

ここで、 M_i は区画iに対して水平方向に接続する区画の数、 $p_{FO,j}$ は隣接する区画jで火災が成長する確率、 N は建築物を構成する区画の数である。このうち、 M_i に鉛直方向に接続する区画を含めない理由は、照明器具などの取り付け部などの床あるいは天井の隙間を通じた鉛直方向の移流量が、開放された扉あるいは閉鎖された扉の隙間などを通じた水平方向の移流量に比べて少ないと考えられるためである。なお、 $p_{FO,j}$ については、事象④に関連して後述する。式(2.2)および(2.3)に示すように、区画iの出火確率 $p_{0,i}$ は、建築物の用途および区画iの規模に依存するため、平面計画が確定した後で調整できる余地は小さい。このため、区画iで煙進入が発生する確率 p_{SI} は、隣接する区画jで火災が成長する確率 $p_{FO,j}$ を左右する仕様の変更を通じて低減を図る必要がある。

2.5 事象③：避難失敗

建築物における火災時の避難安全は、火災によって天井下に蓄積する煙が避難安全上の障害となる高さに降下するまでに避難が完了することをもって確認されることが多い [例えば 2.12]。本研究ではこうした考え方にならない、避難完了時間 t_E （評価関数）と限界煙降下時間 t_S （限界条件）の大小関係に従って建築物の避難安全性能を評価する。ただし、 t_E および t_S は、建築物内部の空間形状や内装材料の燃焼特性などの設計仕様によって一意には定まらず、出火源の燃焼特性や在館者の行動特性など、設計時に特定することが困難な要因によって変化する。そこで、こうした不確実要因を考慮したモンテカルロシミュレーションを行って、次のように避難失敗確率 p_S を評価する。

$$p_S = \Pr(t_E > t_S) \quad (2.5)$$

式(2.5)において、確率変数である t_E 、 t_S に建築物で採用される設計仕様を反映させれば、それらがどの程度、建築物の避難安全性能の向上に寄与しているのかを測ることができる。本研究では、避難安全検証法 [2.12] の考え方を参考にしながら t_E 、 t_S を計算する。

2.5.1 避難完了時間

ある室における在館者の避難完了時間 t_E は、火災が発生してから避難を開始するまでの時間 $t_{E,start}$ 、避難を開始してから当該室の出口である扉に到達するまでの時間 $t_{E,travel}$ 、扉に到達してから通過するまでの時間 $t_{E,queue}$ の和として、次のように評価することができる。

$$t_E = t_{E,start} + t_{E,travel} + t_{E,queue} \quad (2.6)$$

このうち避難開始時間 $t_{E,start}$ は、一般的に出火から在館者が火災を覚知するまでの時間と、覚知から避難を開始するまでの時間に分けて考えることができる。しかし、ここでは、避難安全検証法 [2.12] の階避難安全検証にならい、防災計画評定などの実務において採用されてきた次の計算式を利用する。

$$t_{E,start} = \frac{\sqrt{A_{area}}}{30} \text{ (分)} \quad (2.7)$$

ここで、 A_{area} は当該室及び当該室を通らなければ避難することができない建築物の部分の床面積である。

歩行時間 $t_{E,travel}$ は、避難経路に沿った歩行距離 l を各部分ごとの歩行速度 v で除すことで次のように計算する。

$$t_{E,travel} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{l_i}{v_i} \right) \text{ (分)} \quad (2.8)$$

ここで、下付き文字の i は当該室に到達するまでに在館者が通過する室、 N はその数である。歩行距離 l は、各室の入口となる扉と出口となる扉の位置関係などにも依存するが、ここでは正形状の室の向かい合う位置にある頂点の間のマンハッタン距離に相当するものと考え、次のように計算する。

$$l_i = 2\sqrt{A_i} \quad (2.9)$$

これは、実際の歩行距離を過大に評価するものであり、避難計画上は安全側の評価となっている。

扉通過時間 $t_{E,queue}$ は、当該室を通過する在館者の数を、単位時間あたりに当該室の出口を通過することができる人数で除すことにより次のように計算する。

$$t_{E,queue} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sum_{i=1}^N \rho_i A_i}{N_i B_i} \right) \text{ (分)} \quad (2.10)$$

ここで、 A は室面積、 ρ は在館者密度、 N は有効流動係数、 B は扉幅である。当該室の扉を通過する在館者が、火災が発生した段階で複数の室に分かれて滞在していた場合、当初どの室に滞在していたのかによって、在館者の扉の通過に時間差が生じる可能性がある。しかし、式(2.10)では、当該扉を通過する全ての在館者が一度に扉前に滞留する状況を想定しており、 $t_{E,travel}$ の場合と同様、避難安全上は安全側の評価となっている。

設計条件は、在館者の避難完了時間 t_E を構成する3つの時間（避難開始時間 $t_{E,start}$ 、歩行時間 $t_{E,travel}$ 、扉通過時間 $t_{E,queue}$ ）に反映される。ただし、 $t_{E,start}$ は区画の形状に依存するとしているため、平面計画が決まった後の調整は難しい。また、 $t_{E,travel}$ は、本来であれば扉の位置に依存するが、現時点では評価の対象外となっている。現時点で唯一調整が可能な時間は $t_{E,queue}$ であり、扉の数および幅を変更することで調整することができる。

2.5.2 限界煙降下時間

図 2.5 に模式的に示すように、火災時には、火源上に形成された火災プルームによって運搬された煙が蓄積することで、天井下に高温の煙層が形成される。このとき、ある室における限界煙降下時間 t_s は、煙層の下端高さ z_s が避難安全上の障害となる高さ H_{cr} に降下するまでの時間と定義することができる。すなわち、火源から発生する煙の煙層への体積流入速度を $\dot{V}_s$ 、排煙設備による煙層からの煙の体積排出速度を $\dot{V}_e$ とすれば、 H_{cr} と t_s の関係は次式のよう表される。

$$H - H_{cr} = \frac{\int_0^{t_s} \dot{V}_s - \dot{V}_e dt}{A} \quad (2.11)$$

ただし、 H は室の天井高さである。式(2.11)において、 $\dot{V}_e$ が煙層の厚さによらず一定であるとすれば、 $\dot{V}_s$ が唯一の変数となる。ここでは、火源の発熱速度が時間 t の自乗に比例して拡大するという、火災安全工学において広く導入される仮定を用いることで、次式のように $\dot{V}_s$ を計算する [2.15]。

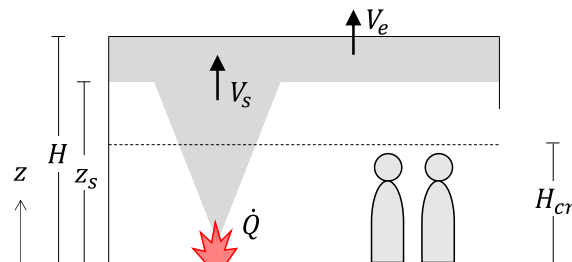


図 2.5 煙層下端高さに基づく安全な避難限界

$$\dot{V}_s = \frac{0.08}{\rho} (\alpha_f + \alpha_m)^{1/3} t^{2/3} z_s^{5/3} \quad (2.12)$$

ここで、 α_f と α_m はそれぞれ収納可燃物と内装材の火災成長率、 t は時間、 z_s は煙層の下端高さである。 $\dot{V}_s$ は、 t だけでなく、 z_s によっても変化することから、本研究では数値的に式(2.11)の解を求めることとする。

上記の定式化に従えば、室の天井高さ H 、室の床面積 A 、内装材の種類に応じた火災成長率 α_m 、あるいは排煙設備の仕様によって決まる煙層からの体積排出速度 $\dot{V}_e$ を変更することで、煙層への体積流入速度 $\dot{V}_s$ の大きさを調整することができる。

2.5.3 不確定要因：火災成長率

式(2.12)に示す通り、煙の体積流入速度 $\dot{V}_s$ は、収納可燃物の火災成長率 α_f と内装材の火災成長率 α_m という2つの建築物側の条件によって左右される。

このうち、 α_m については、避難安全検証法の考え方に従い、表 2.11 に示すような内装材の不燃性に基づく値を設定する。ただし、一般には、室内の上部で使われる内装材の火災拡大への寄与が大きく、床面から 1.2m 以上の部分の壁および天井の室内に面する部分の種類に応じて α_m を定めるものとされていることから [2.14]、ここでもその考え方を踏襲する。

表 2.11 内装材の火災成長率 [2.14]

種類	火災成長率 α_m
不燃材料でした仕上げ	0.0035
令第 129 号第 1 項第二号に掲げる仕上げ	0.014
令第 129 号第 1 項第一号に掲げる仕上げ	0.056
木材その他これに類する材料でした仕上げ	0.35

収納可燃物については、一般に、室の種類に応じてその量が異なり、火災成長率 α_f にも隔たりがあることが知られている。避難安全検証法では、室の種類に応じて火災時の発熱量を設定し、ここから α_f を計算する方式を採用している [2.14]。ただし、避難安全検証法で採用される発熱量には、実態調査により調べられた発熱量の平均に一定の変動分が上増しされた一意の値が設定されており、室に応じたばらつきは考慮されていない。そこで本研究では、 α_f が確率的な分布をとるものとみなし、火災統計に基づき推定された分布形を用いたモンテカルロシミュレーションにより、確率的に α_f を与えることとする。火災報告（総務省消防庁）の 1995 年から 2019 年までの 25 年間の記録の分析によれば、 α_f はガンマ分布で近似可能であることが報告されている [2.16]。ただし本研究では、分布形の扱いやすさを考慮し、これらをさらに対数正規分布に換算したものを使用する（表 2.12）。

表 2.12 収納可燃物の火災成長率 [2.16]

	室の種類		発熱量 (MJ/m ²)	ガンマ分布 (kW/s ²)		対数正規分布 (kW/s ²)		
				α	β	μ	σ	
(一)	住宅の居室		720	0.86	36.7	0.0234	0.0253	
	住宅以外の建築物における寝室または病室		240	0.68	40.6	0.0167	0.0203	
(二)	事務室その他これに類するもの		560	0.62	26.1	0.0238	0.0302	
	会議室その他これに類するもの		160	0.76	40.1	0.0190	0.0217	
(三)	教室		400	0.68	38.8	0.0175	0.0213	
	体育館のアリーナその他これに類するもの		80	0.57	34.7	0.0164	0.0218	
	博物館又は美術館その他これに類するもの		240	0.71	29.5	0.0241	0.0286	
(四)	百貨店の売り場又は物品販売業を営む店舗その他これらに類するもの	家具又は書籍の売り場その他これらに類するもの	950	0.56	8.5	0.0659	0.0880	
		その他の部分	480	0.59	20.1	0.0294	0.0382	
	飲食店その他の飲食室	簡易な食堂	240	0.69	42.8	0.0161	0.0194	
		その他の飲食室	480	0.69	31.2	0.0221	0.0266	
(五)	劇場、映画館、演劇場、観覧場、公会堂、集会場その他これらに類する用途に供する室	客席部分	固定席の場合	400	0.66	28.2	0.0234	0.0288
			その他の部分	480	-	-	-	-
		舞台部分		240	0.61	46.8	0.0130	0.0167
(六)	自動車車庫又は自動車修理工場	車室その他これに類するもの	240	0.71	44.6	0.0159	0.0189	
		車路その他これに類するもの	32	-	-	-	-	
(七)	廊下、階段その他の通路		32	0.65	66.2	0.0098	0.0122	
	玄関ホール、ロビーその他これらに類するもの	劇場、映画館、演芸場、観覧場、公会堂若しくは集会場その他これらに類する用途又は百貨店若しくは物品販売業を営む店舗その他これらに類するもの	160	0.71	49.1	0.0145	0.0172	
		その他のもの	80	-	-	-	-	
(八)	昇降機その他の設備の機械室		160	0.55	45.4	0.0121	0.0163	
(九)	屋上広場又はバルコニー		80	0.53	78.5	0.0068	0.0093	
(十)	倉庫その他の物品の保管の用に供する室		2000	0.7	20.0	0.0350	0.0418	

2.6 事象④：火災発生

本研究における「出火」と「火災発生」の呼称の差異は 2.3 節で定義した通りである。ある区画での出火は、基本的に、当該区画の条件のみによりその確率を評価することができる。一方、他の区画で出火した火災が、内部延焼により当該区画に至ることにより発生する火災の評価には、区画間の連続的な延焼の過程を考慮する必要がある。建築物の規模によっては考慮すべき延焼の経路が膨大な数に上る可能性がある。そこで、事象②の煙進入の場合と同様、個々の区画には火災の延焼を防止する性能が一定程度備わっていることを前提として、ある区画*i*における火災の発生は、「自区画での出火」もしくは「自区画に直接隣接する区画（一次隣接区画）で出火した火災の延焼」のいずれかによって起こるものとする。事象②の説明で示した図 2.4 を参照すれば、区画*i*において火災が発生する確率 p_{FI} は $p_{0,i} +$

$\sum_{j=1}^{M_i} p_{0,j} p_{FO,j} p_{BT,j}$ として求めることができる．ただし，総合的なリスク評価の枠組みにおいて， p_{FI} は当該建築物の出火確率 p_0 の条件付き確率となることから，次のように表される．

$$p_{FI,i} = \frac{p_{0,i} + \sum_{j=1}^{M_i} p_{0,j} p_{FO,j} p_{BT,j}}{\sum_{k=1}^N p_{0,k}} \quad (2.13)$$

ここで， M_i は水平方向および鉛直方向に接続する区画， $p_{BT,j}$ は一時隣接区画 j での区画突破確率である．事象②の煙進入の場合とは異なり， M_i には水平方向だけでなく，鉛直方向に接続する区画を含てある．また， $p_{BT,j}$ については，事象⑥に関連して後述する．式(2.2)および(2.3)に示すように，区画 i の出火確率 $p_{0,i}$ は，建築物の用途および区画 i の規模に依存するため，平面計画が確定した後で調整できる余地は小さい．このため，区画 i において火災が発生する確率 p_{FI} は，隣接する区画 j で火災が成長する確率 $p_{FO,j}$ または区画 j での区画突破確率 $p_{BT,j}$ を左右する仕様の変更を通じて低減を図る必要がある．

2.7 事象⑤：火災成長

区画内で発生した火災は，出火源の位置や大きさなどによっては拡大せず，自然鎮火する場合がある．自然鎮火しない場合であっても，在館者もしくは消防隊による消火活動，またはスプリンクラー設備（以下，SP 設備）などの自動的に作動する散水設備によって，比較的規模が小さい段階で消し止められ，大きな被害を生じない場合もある．火災が発生した建築物の倒壊，または隣接する建築物への延焼といった大きな被害の発生は，鎮火に失敗し，盛期火災に成長した火災によって引き起こされると考えることができる．図 2.6 は，区画内で発生した火災が成長する確率をイベントツリーの形で整理したものである．このイベントツリーに従えば，火災成長が起こる確率 p_{FO} は次のように表される．

$$p_{FO} = \bar{p}_q \bar{p}_{ff,s} (p_{ff0,A} \bar{p}_{ff0,S} + \bar{p}_{ff0,A}) (p_{sp,A} \bar{p}_{sp,S} + \bar{p}_{sp,A}) \quad (2.14)$$

ただし， p_q は自然鎮火が起こる確率， $p_{ff0,A}$ は在館者によって消火活動が行われる確率， $p_{ff0,S}$ は同じく奏功する確率， $p_{sp,A}$ はスプリンクラー設備が作動する確率， $p_{sp,S}$ は同じく奏功する確率， $p_{ff,s}$ は消防隊による消火活動が行われ，盛期火災への成長の防止に成功する確率である．すなわち，式(2.14)に含まれる各事象の発生確率を定量化できれば，火災成長確率 p_{FO} を評価できるようになる．本研究では，火災報告（総務省消防庁）[2.17]を主に利用して式(2.14)の各事象の発生確率をモデル化する．ただし，火災報告には，火災被害を受けた建築物に関する情報が必ずしも十分には記載されていないため，専ら火災報告の記録から発生確率を推定可能な事象と，そうでない事象があった．前者には，自然鎮火，在館者による消火活動の有無・奏功，およびスプリンクラー設備の作動・奏功の各事象が該当する．後者には，消防隊による消火活動の奏功の事象が該当する．本節では，両者の推定の方法について，項を分けて説明する．

2.7.1 統計のみから発生確率を推定できる事象

本研究で分析に使用した火災報告の記録は、1995年から2019年までの25年間分の記録である[2.17]。火災報告には、国内で発生した全ての認知火災の記録が収録されており、なかには非建物火災など、本研究の対象からは外れる事例の記録も含まれている。そこで、「建物火災でない」、「爆発火災でない」ことを条件としてスクリーニングを行った上で、明らかな重複事例を除外した結果、652,821件分の分析可能な記録が得られた。該当する記録を分析することにより得られた各事象の発生確率を表2.13に整理する。表2.13には、全事例の中から分析に使用した事例と、事象が発生した事例の件数を示している。ここでは後者を前者で除すことにより、着目する事象の発生確率を求めることとした。

(1) 自然鎮火

自然鎮火とは、放任状態であるにもかかわらず成長することのない火災を指している。自然鎮火については、「焼損床面積 1m^2 未満の火災」の件数を、「初期消火なし火災」の件数で除すことにより、発生確率（自然鎮火確率） p_q を求めることとした。自然鎮火とみなせる焼損床面積の大きさの決め方には任意性があるが、本研究では、火災報告の記載規則上、最小の水準となる「 1m^2 未満」とした。以上の定義の下で得られた自然鎮火確率は $p_q = 0.394$ となった。

ただし、分子に使用した「焼損床面積 1m^2 未満の火災」、および分母に使用した「初期消火なし火災」のそれぞれ件数の中には、消防隊による消火活動が行われた火災も含まれているため、得られた値が実際の自然鎮火確率に一致するとは限らない。そこで、消防隊による放水が行われなかった火災に限定して自然鎮火確率を求めたところ、 $p_q = 0.897$ となった。この場合には、消防への通報の必要性が感じられないほど出火源の規模が小さく、そのことが消防隊による放水につながらなかった火災が相当数含まれると考えられるため、得られた自然鎮火確率は実際を過大に評価しているものと考えられる。

2つの場合について得られた自然鎮火確率は、いずれも誤差を伴っていると考えられる。誤差の程度を明らかにすることは難しいが、本研究では、より幅広い火源の条件を反映していると考えられる $p_q = 0.394$ を採用することとした。

(2) 消火活動（在館者）の有無

在館者による消火活動の有無については、「消火あり火災」の件数を、「全火災」の件数で除すことにより、発生確率（消火実施確率） $p_{ff0,A}$ を求めることとした。在館者が消火活動に参加するか否かは、火災発見時の火災の状況、利用可能な消火設備の有無、在館者の消火設備への習熟度などに依存すると考えられる。本研究では、こうした要因のうち、「過去1年間の消火訓練の実施の有無」に着目して $p_{ff0,A}$ の違いを調べている。ただし、ここで言う消火訓練は、消防法に規定される消火器や屋内消火栓を使用した初期消火訓練のことを指

す。この結果、消火訓練が行われていた場合の消火実施確率は $p_{ff0,A} = 0.860$ 、消火訓練が行われていなかった場合の消火実施確率は $p_{ff0,A} = 0.522$ となった。こうした比較を行えるようにすることで、建築物の日常的な防火管理体制の状態を、建築物の性能評価に反映することが可能になる。

(3) 消火活動（在館者）の奏功

在館者による消火活動の奏功については、「焼損床面積 1m² 未満の火災」の件数を、「初期消火あり火災」の件数で除すことにより、発生確率（消火奏功確率） $p_{ff0,S}$ を求めることとした。在館者による消火活動の奏功についても、消火活動の有無と同様、建築物の日常的な防火管理体制の状態が影響をしていると考えられることから、本事象についても、「過去 1 年間の消火訓練の実施の有無」に着目して $p_{ff0,S}$ の違いを調べている。この結果、消火訓練が行われていた場合の消火奏功確率は $p_{ff0,S} = 0.881$ 、消火訓練が行われていなかった場合の消火奏功確率は $p_{ff0,S} = 0.601$ となった。なお、自然鎮火の場合と同様、初期消火が成功したとみなせる焼損床面積の大きさの上限は「1m² 未満」としてある。これは、火災報告の記載規則上の最小の水準に相当するが、これ以上の焼損床面積であっても消火活動が奏功している場合があることを考えれば、表 2.13 に示した $p_{ff0,S}$ の値は、計画上で安全側の水準となっている。

(4) スプリンクラー設備の作動

SP 設備の作動確率 $p_{SP,A}$ は、「SP 設備が作動した火災」の件数を、「SP 設備の作動条件を満たす火災」の件数で除すことで求めることができる。このうち、「SP 設備が作動した火災」の件数は火災報告に記載されている情報から特定することが可能である。しかし、「SP 設備の作動条件を満たす火災」については、SP 設備の感知部周辺で一定の温度上昇があり、作動条件に至っていたのか否か、火災報告に記載されている情報から判断することは難しい。そこで、定期点検調査の結果をもとに SP 設備の非故障率を分析した結果を参考に、 $p_{SP,A} = 0.977$ を採用することとした [2.18]。

(5) スプリンクラー設備の奏功

SP 設備による消火の奏功については、「焼損床面積が一定未満の火災」の件数を、「SP 設備が作動した火災」の件数で除すことにより、発生確率（奏功確率） $p_{SP,S}$ を求めることとした。表 2.13 には、消火が成功したとみなせる焼損床面積の水準を 1m²、2m²、3m² の 3 段階に分けて $p_{SP,S}$ を示してある。このように、在館者の消火活動の奏功水準である 1m² よりも高い水準を検討した理由は、SP 設備が、火源の規模がある程度大きくなった段階で初めて作動することを踏まえたもので、1m² を上回る焼損床面積であっても、SP 設備による消火奏功事例が含まれると考えられるためである。明確な根拠に基づいて具体的な水準を特定す

ることは難しいが、本研究では計画上安全側の評価が行えるよう、「焼損床面積 1m^2 未満の火災」を奏功した事例とみなして $p_{SP,S}$ を設定する。

なお既往研究 [2.19] では、本研究と同様に火災報告を利用することで、奏功水準を焼損床面積 1m^2 未満とした場合の奏功確率を $p_{SP,S} = 0.65$ と推定している。本研究で算出された値との差異は、奏功確率の定義の違いにある。既往研究では、図 2.7 において、SP 設備が作動しなければ自然鎮火していたであろう焼損床面積 A_b が 0m^2 の記録 a を除外した $p_{SP,S} = b/(b + c)$ を奏効確率として定義している。これに対し、本研究では、図 2.6 のイベントツリーにおいて明示的に自然鎮火を考慮しているため、記録 a を除外しない $p_{SP,S} = (a + b)/(a + b + c)$ を奏功確率として定義している。

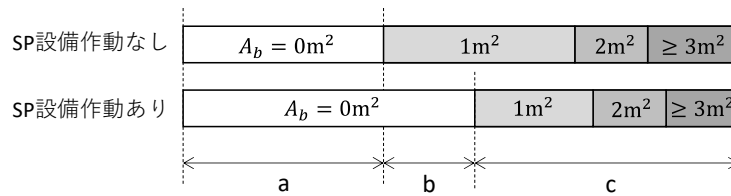


図 2.7 既往研究における SP 設備の奏効確率の考え方 [2.19]

2.7.2 消火活動（消防隊）による盛期火災への成長防止

図 2.6 のイベントツリーにおいて、火災報告などの統計データのみを用いて消防隊の消火活動による盛期火災への成長防止確率をモデル化することが難しい。これは、消防隊が消火活動を開始する時点ですでに火災の規模が拡大してしまっており、焼損床面積などの記録から消火活動が奏功したのか否かを判定することが難しい場合があること、また、火災報告に収録される記録からは、火災室が一体的に燃焼する盛期火災に至っていたのか否かを判定することが難しいためである。

そこで本研究では、消防隊が通報を受けてから放水を開始するまでの時間（放水開始時間） t_{ff} と、消防隊の放水によって盛期火災への発展を食い止めることができる限界時間（放水開始限界時間） $t_{ff,cr}$ の大小関係に基づいて、次式に従って奏功確率（消火成功確率） $p_{ff,S}$ を求めることとする。

$$p_{ff,S} = \Pr(t_{ff} \leq t_{ff,cr}) \quad (2.15)$$

ただし、後述するように、 t_{ff} と $t_{ff,cr}$ はいずれも確率的に変動することから、モンテカルロシミュレーションを行うことにより $p_{ff,S}$ を計算する。

(1) 放水開始時間

放水開始時間 t_{ff} は、火災報告により火災事例ごとに特定することができるが、消防署から

火災現場までの駆け付け時間，すなわち駆け付け距離 d に依存する．図 2.8 は，火災報告から抽出された駆け付け距離 d と放水開始時間 t_{ff} の関係を整理したものである． d が大きくなるほど t_{ff} も大きくなる傾向が見て取れるが，小さくないばらつきを伴っており，消防署から火災現場までの道路・交通状況などによる影響を受けていることが推察される．ただし，個々の火災事例における道路・交通状況を遡って特定することは困難であることから，ここではこれを不確実要因とみなして， t_{ff} が対数正規分布に従うものと仮定する．そうした前提の下で火災報告より抽出された d と t_{ff} の関係を回帰すれば，次のように t_{ff} をモデル化することができる．

$$t_{ff} \sim \text{LogNormal}(\mu = 3.45d^{0.337}, \sigma = 5.43) \text{ (min)} \quad (2.16)$$

ただし，火災報告における定義に合わせるため，式(2.16)において， d の単位は（百 m）である．図 2.8 には，式(2.16)により得られる t_{ff} の累積分布を重ね合わせてあり，火災報告に記された実測値との一致は概ね良好である．

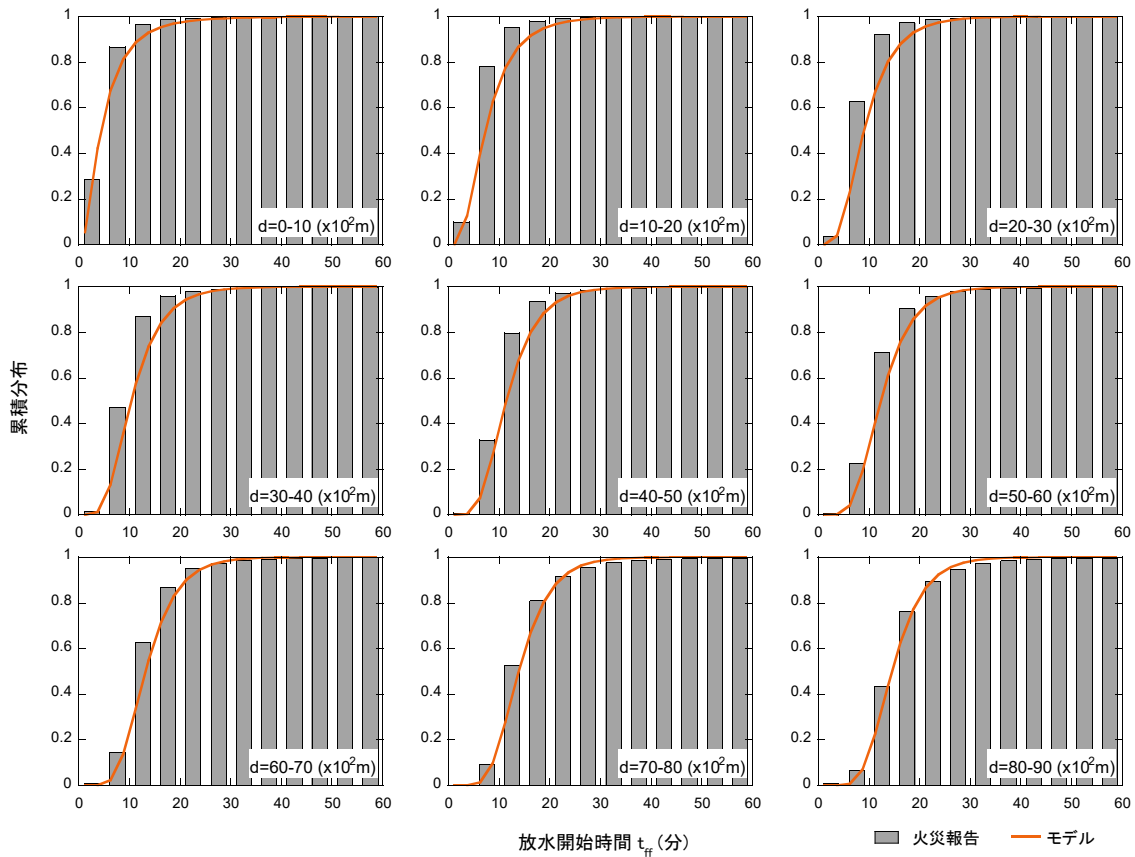


図 2.8 駆け付け距離 d に応じた放水開始時間 t_{ff} の累積分布（火災報告とモデルの比較）

(2) 限界放水開始時間

建築物内部で発生した火災に対する消防隊の放水は、屋内に進入した後に行われることが基本であるが、火災の規模が大きくなり、消防隊員の安全が確保できないと判断されれば、屋外からの放水に切り替えられる。限界放水開始時間 $t_{ff,cr}$ は、消防隊の屋内での消火活動限界時間を指す。これは、建築物内部の火災の状態、建築物の消火活動に対する支援機能の有無、消火活動にあたる消防隊の体制などの様々な要因によって左右されるが、現時点ではこれらの効果を適切に評価することが難しいことから、出火後に規模を拡大する火災が盛期火災に移行する時間、あるいは盛期火災への移行の阻止が困難となる時間を $t_{ff,cr}$ とみなすこととする。ここで火災の初期段階における発熱速度 $\dot{Q}_B$ の成長は、時間 t の自乗に比例すると仮定できることが知られている ($\dot{Q}_B = \alpha t^2$)。これが盛期段階にまで発展すれば、換気に支配される定常的な燃焼に移行する ($\dot{Q}_B = 1500A\sqrt{H}$)。すなわち、初期段階から盛期段階への移行時間は、両者を等置することにより得られる次式により推定することができる。

$$t_{ff,cr} = \frac{1}{60} \left(\frac{\dot{Q}_{B,cr}}{\alpha} \right)^{1/2} \quad (\text{分}) \quad (2.17)$$

ここで、 α は火災成長率、 $\dot{Q}_{B,cr}$ は初期段階から盛期段階へ移行する際の限界発熱速度である。ただし、盛期段階への移行阻止が困難となる時間は、盛期火災となる時間に先行する可能性がある。ここでは、移行阻止が困難となる限界の発熱速度を $\dot{Q}_{ff,cr}$ と置き、次式のように $t_{ff,cr}$ を計算することとする。

$$\dot{Q}_{B,cr} = \max\{1500A\sqrt{H}, \dot{Q}_{ff,cr}\} \quad (2.18)$$

ここで、 A は開口部面積、 H は開口部の下端から上端までの高さである。なお、 α には、室の用途に応じた表 2.12 の値を利用する。また、式(2.17)に示した $t_{ff,cr}$ では、 $t_{ff,cr}$ に影響を及ぼし得る建築物側の要件を限定的にしか考慮していない。より幅広い要件が建築物の消防活動支援性能に及ぼす影響を評価できるようにするには、例えば、利用可能な消火設備の種類、非常用エレベーターなどの移動手段の有無、消防活動拠点の形成の有無などの影響を反映できるようにすることなどが考えられる。しかし、現時点では定量化に必要な知見が十分に蓄積されていないため、将来的な課題として残す。

2.8 事象⑥：区画突破

区画内で発生した火災が盛期火災にまで発展すると、強い加熱を長時間にわたって受ける壁、天井、扉などの区画を構成する部材が損傷し、隣接する区画への延焼経路が形成される場合がある。部材の損傷に伴う区画の突破確率 p_{BT} の評価には、部材の耐火性能に関する法令適合が、標準加熱の下での当該部材の性能担保時間の長さにより確認されていること

を踏まえた手続きを採用する．すなわち，標準加熱と等価な加熱の下での火災継続時間（等価火災継続時間） t_F^* が，標準加熱の下での部材の性能担保時間（保有耐火時間） t_R を上回る場合に部材が突破されるものとみなす．このうち，等価火災継続時間 t_F^* は，建築物内の収納可燃物密度の実態調査の結果 [2.20] を踏まえて，対数正規分布に従うものとする．これに対し，保有耐火時間 t_R もある程度のばらつきを有するものと考えられるが，これを推定するに足るだけのデータがないこと，また，部材の製作コスト低減の観点から t_R に付与されている余裕度は小さいと考えられることから，一定値をとるものとする．この場合，突破確率 p_{BT} は，標準正規分布の累積分布関数 Φ および信頼性指標 β_{BT} を用いて以下のように表される．

$$p_{BT} = \Pr(t_R < t_F^*) = 1 - \Phi(\beta_{BT}) \quad (2.19)$$

$$\beta_{BT} = \frac{\ln t_R - \lambda_F}{\xi_F} \quad (2.20)$$

ここで， λ_F と ξ_F は，それぞれ次のように定義される対数正規分布のパラメータである．

$$\lambda_F = \ln \left\{ \frac{\mu_F}{\sqrt{1 + (\sigma_F/\mu_F)^2}} \right\} \quad (2.21)$$

$$\xi_F = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_F}{\mu_F} \right)^2 \right]} \quad (2.22)$$

ここで， μ_F と σ_F はそれぞれ等価火災継続時間 t_F^* の平均と標準偏差である．ただし，式(2.19)では，等価火災継続時間 t_F^* と部材の保有耐火時間 t_R の関係が明示的ではないため，次のような近似式を導入して，それぞれが確率 p_{BT} に及ぼす影響を把握できるようにする [2.21]．

$$p_{BT} = \frac{1}{1 + 1.32(t_R/t_F^*)^{5.24}} \equiv F(t_R/t_F^*) \quad (2.23)$$

部位によって異なり得る火災加熱の程度は，等価火災継続時間 t_F^* に反映されるため，ここで定義した関数 F 自体は，部位に依存しない一般化された突破確率 p_{BT} の計算式となっている．これ以降の突破確率 p_{BT} の評価には，関数 F を使用する．

2.8.1 延焼先との位置関係に応じた区画突破確率

ある区画が盛期火災となった場合の区画突破確率 p_{BT} は，火災区画と延焼先となる区画の位置関係に応じて，(1) 水平方向への突破と，(2) 鉛直方向への突破，の2通りに分けて考えることができる．

(1) 水平方向への突破

まず，区画が水平方向に突破される場合には，内部で発生する火災からの加熱により，扉

または壁のいずれかが突破される。扉と壁の間では、保有耐火時間および火災加熱に暴露される面積が異なる場合があることを考慮すれば、区画突破確率 p_{BT} は次のように計算することができる [2.21]。

$$p_{BT} = 1 - (1 - p_{BT,D})^r (1 - p_{BT,W})^{1-r} \quad (2.24)$$

ここで、 r は壁面に対する扉部分の面積の比率（開口率）、 $p_{BT,D}$ および $p_{BT,W}$ はそれぞれで単体の扉および壁が突破される確率である。 $p_{BT,D}$ および $p_{BT,W}$ は、区画内部で発生する火災の等価火災継続時間 $t_{F(1)}^*$ と、当該部材の保有耐火時間 $t_{R,D}$ および $t_{R,W}$ を、それぞれ式(2.23)に代入することで、次のように計算することができる。

$$p_{BT,D} = F\left(\frac{t_{R,D}}{t_{F(1)}^*}\right) \quad (2.25)$$

$$p_{BT,W} = F\left(\frac{t_{R,W}}{t_{F(1)}^*}\right) \quad (2.26)$$

なお、区画突破防止上の機能が期待される扉（防火扉など）では、障害物などによる閉鎖障害が起こる場合もあるが、本研究では常に閉鎖されていることとし、作動上の不確実性は考慮しない。これは、計算の便を考慮した仮定であるが、延焼防止の観点からは危険側の評価につながる可能性がある。このため、計算結果の解釈には留意が必要であるが、一般には、閉鎖障害が起こる確率は数パーセント程度と見込まれるため [2.18]、その程度は限定的と考えられる。

(2) 鉛直方向への突破

一方、区画が鉛直方向に突破される場合では、下層階への突破の可能性を無視し、上層階への延焼のみを考慮する。この場合、区画の突破が、床の突破、もしくは開口噴出火炎による外壁面の突破のいずれかによるものと考え、次のように突破確率 p_{BT} を計算する。

$$p_{BT} = 1 - (1 - p_{BT, \text{floor}})(1 - p_{BT, \text{flame}}) \quad (2.27)$$

ここで、 $p_{C, \text{floor}}$ は床が突破されることによる上階延焼確率、 $p_{BT, \text{flame}}$ は開口噴出火炎によって外壁面が突破されることによる上階延焼確率である。これらの確率は、火災継続時間（床の場合は内部で発生する火災の等価火災継続時間 $t_{F(1)}^*$ 、外壁面の場合は開口噴出火炎による等価火災継続時間 $t_{F(2)}^*$ ）と、部材の保有耐火時間（床の場合は $t_{R, \text{floor}}$ 、外壁面の場合は $t_{R,D}$ または $t_{R,W}$ ）を式(2.23)に代入することで、次のように計算できる。

$$p_{BT, \text{floor}} = F\left(\frac{t_{R, \text{floor}}}{t_{F(1)}^*}\right) \quad (2.28)$$

$$p_{BT,flame} = 1 - \left\{ 1 - F \left(\frac{t_{R,D}}{t_{F(2)}^*} \right) \right\}^r \left\{ 1 - F \left(\frac{t_{R,W}}{t_{F(2)}^*} \right) \right\}^{1-r} \quad (2.29)$$

開口噴出火炎によって外壁面が突破される場合については、窓と壁の間で保有耐火時間および火災加熱に暴露される面積が異なる場合があることを考慮して、式(2.24)と同様の定式化を行っている。

2.8.2 等価火災継続時間

等価火災継続時間の計算には、実際の火災継続時間 t_F をあらかじめ計算しておく必要がある。ここでは、区画内の収納可燃物量から想定される総発熱量 Q_C を、盛期火災時の発熱速度 $\dot{q}_B$ で除すことにより、次のように計算する。

$$t_F = \frac{Q_C}{60\dot{q}_B} \quad (2.30)$$

ただし、発熱速度 $\dot{q}_B$ の計算には、区画模型実験の結果を回帰することで得られ、耐火性能検証法で採用された次式を使用する [2.22]。

$$\dot{q}_B = \begin{cases} 1.6\chi \cdot A_{fuel} & (\chi \leq 0.081) \\ 0.13 \cdot A_{fuel} & (0.081 < \chi \leq 0.1) \\ (2.5\chi \cdot \exp(-11\chi) + 0.048) \cdot A_{fuel} & (0.1 < \chi) \end{cases} \quad (2.31)$$

ここで、 χ は次式のように定義される燃焼型支配因子である [2.22]。

$$\chi = \frac{A\sqrt{H}}{A_{fuel}} = \max \left[\frac{\sum A_{OP}\sqrt{H_{OP}}}{A_{fuel}}, \frac{A_R\sqrt{H_R}}{70A_{fuel}} \right] \quad (2.32)$$

等価火災継続時間 t_F^* は、実際の火災における部材への入射熱流束の累計値が、標準加熱曲線による入射熱流束の累計値に一致するよう、次式により実際の火災継続時間 t_F を換算する [2.23]。

$$\int_0^{60t_F} \dot{q}'' dt = \left(\int_0^{60t_F} h_k \Delta T dt \right) = \int_0^{60t_F^*} \dot{q}_{ISO}'' dt = \left(\int_0^{60t_F^*} h_k \Delta T_{ISO} dt \right) \quad (2.33)$$

ここで、 $\dot{q}''$ は実際の火災による入射熱流束、 $\dot{q}_{ISO}''$ は標準加熱曲線による入射熱流束、 h_k は実効熱伝達率、 ΔT は実際の火災による温度上昇、 ΔT_{ISO} は標準加熱曲線による温度上昇である。ただし、実際の火災による入射熱流束 $\dot{q}''$ は、建築物の部位によって異なることを考慮し、(1) 区画を構成する壁・床・扉が内部火災からの加熱を受ける場合、(2) 火災となった区画の上階が開口噴出火炎からの加熱を受ける場合、に分けて換算式を用意する。

(1) 区画を構成する壁・床・扉が内部火災からの加熱を受ける場合

区画を構成する壁・床・扉が内部火災からの加熱を受ける場合については、耐火性能検証法 [2.22] に示される温度上昇 ΔT の予測式を式(2.33)に代入して整理することで、次のように実際の火災継続時間 t_F を等価火災継続時間 $t_{F(1)}^*$ に換算する。

$$t_{F(1)}^* = \left(\frac{\alpha}{460} \right)^{3/2} \cdot t_F \quad (2.34)$$

ただし、 α は次式のように定義される火災温度上昇係数である。

$$\alpha = 1280 \left(\frac{\dot{q}_B}{\sqrt{\sum A_c l_h} \sqrt{f_{op}}} \right)^{2/3} \quad (2.35)$$

ここで、 $\sum A_c l_h$ は火災室周壁による熱吸収を表す因子、 $\sqrt{f_{op}}$ は有効開口因子である。

(2) 火災となった区画の上階が開口噴出火炎による加熱を受ける場合

火災となった区画の上階が開口噴出火炎による加熱を受ける場合については、開口噴出火炎に関する既往の温度上昇計測結果 [2.24] を式(2.33)に代入して整理することで、次のような開口上端からの高さ z に応じた換算式が得られる。

$$t_{F(2)}^* = \begin{cases} 0.27 Q_{ef}^* \cdot t_F^{3/4} & (z/r_0 < 1) \\ 0.27 Q_{ef}^* (z/r_0)^{-3/4} \cdot t_F^{3/4} & (1 \leq z/r_0 < 4.83) \\ 0.80 Q_{ef}^* (z/r_0)^{-3/2} \cdot t_F^{3/4} & (4.83 \leq z/r_0) \end{cases} \quad (2.36)$$

ここで、 r_0 は等価開口半径、 $Q_{ef}^* = \dot{q}_{ef}/c_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2} r_0^{5/2}$ は無次元発熱速度、 $\dot{q}_{ef}$ は噴出火炎の実質的な発熱速度、 c_p は比熱、 ρ_∞ は密度、 T_∞ は外気温、 g は重力加速度である。このうち $\dot{q}_{ef}$ は、換気による持ち出し分に、区画外での燃焼分を加算することで次式のように計算することができる。

$$\dot{q}_{ef} = c_p \dot{m} \Delta T + \Delta H_C \left(\dot{m}_B - \frac{\dot{m}}{\gamma} \right) \text{ (kW)} \quad (2.37)$$

ここで、 $\dot{m}$ は換気速度、 ΔH_C は未燃ガスの燃焼熱、 $\dot{m}_B$ は火災区画における可燃物の燃焼速度、 γ は空気燃料比である。

2.8.3 不確定要因：収納可燃物密度

収納可燃物については、一般に、室の種類に応じてその量が異なることが知られている。耐火性能検証法では、既往の実態調査結果に基づいて収納可燃物密度 w を設定し、ここから火災継続時間 t_F を計算できるようにしている [2.22]。耐火性能検証法で採用される収納可

燃物密度 w には、実態調査により調べられた収納可燃物密度 w の平均に一定の変動分が加算されており、計画上、安全側の評価とすることを前提としている。しかし、本研究では、式(2.19)に従って確率的に突破確率 p_{BT} の評価を行うこととしており、すでに変動分が加算された値を分布の平均とみなして代入することは、計算の手続き上、適切ではない。そこで、データはいくぶん古くなってしまうものの、1989年に公表された報告に基づいて、表2.14に示すように収納可燃物密度 w の平均と標準偏差を与える[2.20]。

表 2.14 収納可燃物密度 [2.20]

建物用途	室用途	収納可燃物密度 w (kg/m ²)			調査数	
		範囲	平均	標準偏差	棟数	室数
事務所	事務系事務室	9.9~18.8	14.0	6.5	7	8
		9.9~34.7*	17.1	7.6	8	10
	技術系事務室	17.0~30.1	22.3	4.7	5	6
	行政事務室	39.1~50.5	45.3	4.6	1	5
	設計室	32.4~40.8	36.5	4.1	4	5
	打ち合わせ室／会議室／応接室／役員室等	2.4~14.4	7.0	4.1	6	13
	資料室／図書室	45.4~137.7	83.1	29.9	7	10
	倉庫	126.6~234.1	185.2	54.4	2	3
	ロビー	4.2~19.1	10.8	6.3	4	4
学校	普通教室	6.1~30.7	16.1	5.8	-	104
	理科教室	8.4~30.0	17.6	5.3	-	36
	理科準備室	11.4~58.4	32.6	9.6	-	29
	家庭科教室	8.9~22.6	17.0	4.3	-	25
	家庭科準備室	8.7~61.6	26.5	13.3	-	16
	図書室	12.3~72.8	35.9	16.5	-	21
共同住宅	住宅	8.8~36.1	19.1	5.3	-	162
	住宅	-	19.6	7.3	-	755
ホテル	客室	7.9~13.3	10.5	1.5	2	15
	宴会室	2.9~6.8	4.4	1.5	1	6
	ロビー	-	2.8	-	1	1
体育館	球戯場	-	0.2	-	1	1
	柔道場	-	4.8	-	1	1
	器具庫	13.0~42.3	26.8	14.7	1	3
	更衣室	1.8~2.5	2.2	-	1	2
	玄関ホール	-	5.8	-	1	1
	クラブ室	6.0~9.1	7.1	1.4	1	4
劇場	大道具制作室	-	43.6	-	1	1
	大道具倉庫	56.9~73.1	65.0	-	1	2
	奈落	-	10.2	-	1	1
	舞台	-	4.3	-	1	2
	舞台袖	20.5~20.6	20.6	-	1	6
倉庫	紙倉庫	844.6~1261.0	1061.4	142.6	1	6
デパート	売り場	9.0~30.8	19.1	8.5	1	6

* 広報関係の2室を含む

2.9 事象⑦：崩壊

本研究では、耐火性能検証法 [2.22] を利用した鈴木らの計算手続き [2.25] にならって室の崩壊確率 p_C の評価を行う。耐火性能検証法では、建築物内の室ごとの火災継続時間 t_F と、室に面する耐力部材のうち検証対象となる部材の保有耐火時間 t_{fr} をそれぞれ計算し、保有耐火時間 t_{fr} が火災継続時間 t_F を上回る場合にその部材の安全性を確認する [2.22]。このうち、室の火災継続時間 t_F は、固定荷重、積載荷重などの常時荷重の大きさに左右される。また耐力部材の保有耐火時間 t_{fr} は、耐力部材にかかる常時荷重の大きさに加え、部材の強度などに左右される。後述するように、火災加熱を受ける耐力部材の状態は不連続な関数により表されるため、その損傷確率を解析的に求めることは容易ではない。そこで本研究では、これらを不確実要因とみなしたモンテカルロシミュレーションを行うことにより、耐力部材の損傷確率の評価を行う。すなわち、保有耐火時間 t_{fr} が火災継続時間 t_F 以下となる確率が、部材の損傷確率 p_C として評価されることになる。

$$p_C = \Pr(t_{fr} \leq t_F) \quad (2.38)$$

耐力部材は架構を形成していることから、室の崩壊確率 p_C の評価には、本来であれば架構としての評価が必要となるが、本研究では、室の架構を形成する柱および梁のうち、代表となるものをそれぞれ一つ選択し、そのいずれもが損傷しない確率を室の崩壊確率 p_C とみなす。

$$p_C = 1 - (1 - p_{C,C})(1 - p_{C,B}) \quad (2.39)$$

ここで、 $p_{C,C}$ は柱の損傷確率、 $p_{C,B}$ は梁の損傷確率である。なお、本手法で評価可能な構造種別はS造のみであるが、木造、RC造など、その他の構造種別についても評価を行えるよう検証法の改良を進めていく必要がある。

損傷確率 $p_{C,C}$ および $p_{C,B}$ を求めるための火災継続時間 t_F には、前節の場合と同様、耐火性能検証法の計算手続きを採用する。一方、部材の保有耐火時間 t_{fr} の計算には、柱と梁の別なく、以下の式を使用する [2.22]。

$$t_{fr} = \max \left[\frac{9866}{\alpha^{3/2}} \left\{ \frac{2}{h} \left[\frac{1}{\ln(h^{1/6}(T_{cr}-20)/1250)} \right]^2 + t_w \right\}, \left(\frac{T_{cr}-20}{\alpha} \right)^6 \right] \quad (2.40)$$

ここで、 α は火災温度上昇係数、 T_{cr} は限界部材温度、 h は部材温度上昇係数、 t_w は温度上昇遅延時間である。これらのうち、 α の計算には、前項で示した式(2.35)を利用することができる。 h と t_w は部材の断面形状や被覆の条件に依存する値をとるものであり、本検証法では表2.15、表2.16に示すように、耐火性能検証法 [2.22] に例示された値の中から該当するものを選択して使用することとする。残る変数は T_{cr} であるが、本研究では耐火性能検証法 [2.22] にならって、柱については2.9.1項に、梁については2.9.2項に、それぞれ示す手続きに従って計算することとする。

表 2.15 柱の部材特性（文献 [2.22] より一部抜粋， t_w は非載荷加熱試験時の測定値）

形状	幅厚比 H/ t1 (H 形, ウェブ)	幅厚比 B/ t2 (H 形, フランジ)	幅厚比 B/t (角 形)	部材温度 上昇係数 h (1/min)	温度上昇 遅延時間 t_w (分)	断面二 次半径 i_x (mm)	断面二 次半径 i_y (mm)
H200×200×8×12 (RW27.6mm)	25.0	16.7	—	0.01159	16.7	86.2	50.2
H200×200×8×12 (RW45.8mm)	25.0	16.7	—	0.00782	35.6	86.2	50.2
H200×200×8×12 (RW67.1mm)	25.0	16.7	—	0.00548	71.6	86.2	50.2
H300×300×10×15 (RW26.8mm)	30.0	20.0	—	0.01003	17.8	131	75.5
H300×300×10×15 (RW46.1mm)	30.0	20.0	—	0.00641	39.2	131	75.5
H300×300×10×15 (RW65.8mm)	30.0	20.0	—	0.00456	72.3	131	75.5
H400×400×13×21 (RW26.5mm)	30.8	19.0	—	0.00787	19	175	101
H400×400×13×21 (RW45.7mm)	30.8	19.0	—	0.00466	40.4	175	101
□ 300×300×6 (RW26.0mm)	—	—	50	0.01304	10.8	119	119
□ 300×300×6 (RW47.8mm)	—	—	50	0.00817	24	119	119
□ 300×300×9 (RW25.3mm)	—	—	33.3	0.01076	18.4	117	117
□ 300×300×9 (RW65.5mm)	—	—	33.3	0.00451	60.1	117	117
□ 300×300×12 (RW48.1mm)	—	—	25	0.00432	33.8	116	116
□ 300×300×12 (RW66.0mm)	—	—	25	0.00378	57.6	116	116
□ 400×400×19 (RW28.1mm)	—	—	21.1	0.0053	16.2	152	152
□ 400×400×19 (RW43.71mm)	—	—	21.1	0.00402	37.7	152	152
H100×100×6×8 (CS20mm)	16.7	12.5	—	0.01349	11.8	41.8	24.9
H100×100×6×8 (CS25mm)	16.7	12.5	—	0.01221	22.7	41.8	24.9
H100×100×6×8 (CS40mm)	16.7	12.5	—	0.00564	17.2	41.8	24.9
H100×100×6×8 (CS50mm)	16.7	12.5	—	0.00286	18.8	41.8	24.9
H200×200×8×12 (CS20mm)	25.0	16.7	—	0.00825	9.1	86.2	50.2
H200×200×8×12 (CS25mm)	25.0	16.7	—	0.00812	19.1	86.2	50.2
H200×200×8×12 (CS40mm)	25.0	16.7	—	0.00353	12.5	86.2	50.2
H200×200×8×12 (CS50mm)	25.0	16.7	—	0.00383	55.2	86.2	50.2
H300×300×10×15 (CS20mm)	30.0	20.0	—	0.00882	34.1	131	75.5
H300×300×10×15 (CS25mm)	30.0	20.0	—	0.00447	6.2	131	75.5
H300×300×10×15 (CS40mm)	30.0	20.0	—	0.00564	59.8	131	75.5
H400×400×13×21 (CS20mm)	30.8	19.0	—	0.00287	19.1	175	101
H400×400×13×21 (CS25mm)	30.8	19.0	—	0.0032	6.7	175	101
□ 125×125×3.2 (CS20mm)	—	—	39.1	0.01972	13.7	50.00	50.00
□ 125×125×3.2 (CS25mm)	—	—	39.1	0.01535	22	50.00	50.00
□ 125×125×3.2 (CS40mm)	—	—	39.1	0.00747	21	50.00	50.00
□ 125×125×3.2 (CS50mm)	—	—	39.1	0.00731	55.1	50.00	50.00
□ 200×200×6 (CS20mm)	—	—	33.3	0.01145	11.7	78.60	78.60
□ 200×200×6 (CS25mm)	—	—	33.3	0.0097	25.9	78.60	78.60
□ 200×200×6 (CS40mm)	—	—	33.3	0.00462	14.5	78.60	78.60
□ 200×200×6 (CS50mm)	—	—	33.3	0.00308	—	78.60	78.60
□ 300×300×9 (CS20mm)	—	—	33.3	0.00812	19.1	117.00	117.00
□ 300×300×9 (CS25mm)	—	—	33.3	0.00812	19.1	117.00	117.00
□ 300×300×9 (CS40mm)	—	—	33.3	0.00312	14.2	117.00	117.00
□ 400×400×19 (CS20mm)	—	—	21.1	0.00287	19.1	152	152.00
□ 400×400×19 (CS25mm)	—	—	21.1	0.00264	10.8	152.00	152.00

※ RW : 吹付けロックウール，CS : ケイ酸カルシウム板

表 2.16 梁の部材特性（文献 [2.22] より一部抜粋， t_w は非載荷加熱試験時の測定値）

形状	幅厚比 H/t1 (H 形, ウェ ブ)	幅厚比 B/t2 (H 形, フラ ンジ)	部材温度 上昇係数 h (1/min)	温度上昇 遅延時間 t_w (分)	断面二 次半径 i_x (mm)	断面二 次半径 i_y (mm)	塑性断面係 数 Z_{pBx} (mm)
H350×175×7×11 (RW30.2mm)	50	15.9	0.00982	23.3	146	39.6	864000
H350×175×7×11 (RW46.7mm)	50	15.9	0.00712	54.1	146	39.6	864000
H350×175×7×11 (RW66.3mm)	50	15.9	0.00554	83.8	146	39.6	864000
H400×200×8×13 (RW27.7mm)	50	15.4	0.01027	18.5	168	45.6	1310000
H400×200×8×13 (RW46.8mm)	50	15.4	0.00641	60.5	168	45.6	1310000
H400×200×8×13 (RW68.0mm)	50	15.4	0.00436	103	168	45.6	1310000
H594×302×14×23 (RW27.8mm)	42.4	13.1	0.00652	21.3	248	69.8	4500000
H594×302×14×23 (RW47.8mm)	42.4	13.1	0.00403	60	248	69.8	4500000
H350×175×7×11 (CS20mm)	50	15.9	0.0071	4.8	146	39.6	864000
H350×175×7×11 (CS30mm)	50	15.9	0.00496	14.3	146	39.6	864000
H350×175×7×11 (CS40mm)	50	15.9	0.00304	9.4	146	39.6	864000
H400×200×8×13 (CS20mm)	50	15.4	0.00541	6.2	168	45.6	1310000
H400×200×8×13 (CS30mm)	50	15.4	0.00453	19.2	168	45.6	1310000
H400×200×8×13 (CS40mm)	50	15.4	0.00279	4.3	168	45.6	1310000
H594×302×14×23 (CS20mm)	42.4	13.1	0.0031	—	248	69.8	4500000
H594×302×14×23 (CS30mm)	42.4	13.1	0.00282	12.1	248	69.8	4500000

※ RW : 吹付けロックウール, CS : ケイ酸カルシウム板

2.9.1 柱の部材限界温度

柱の部材限界温度 $T_{cr,C}$ は, 全体座屈に対する上限温度 T_B , 局部座屈に対する上限温度 T_{LB} , 熱変形に対する上限温度 T_{DP} , 継ぎ手等の弱点部に対する上限温度 (550℃) の中の最小値をとるものとして, 次のように表すこととする.

$$T_{cr,C} = \min[T_B, T_{LB}, T_{DP}, 550] \quad (2.41)$$

このうち全体座屈に対する上限温度 T_B は, 柱の常温時の軸力比 p と無次元有効細長比 λ を用いて次のように計算する.

$$T_B = \begin{cases} 700 - 375p & (\lambda < 0.1) \\ \max \left[700 - 375p - 55.8(p + 30p^2)(\lambda - 0.1), 500 \sqrt{1 - \frac{p(1+0.267\lambda^2)}{1-0.24\lambda^2}} \right] & (0.1 \leq \lambda < 1) \end{cases} \quad (2.42)$$

ただし, 無次元有効細長比 λ は次式により定義される.

$$\lambda = \frac{l_e/i}{\pi\sqrt{E/F}} \quad (2.43)$$

ここで、 l_e は柱の長さ、 i は断面二次半径、 E は常温時弾性係数、 F は常温時基準強度である。

局部座屈に対する上限温度 T_{LB} は、柱の常温時の軸力比 p と部材断面の形状と幅厚比 B/t に関する係数 R_{LBO} を用いて次のように計算する。

$$T_{LB} = 700 - \frac{375p}{\min(R_{LBO}, 0.75)} \quad (2.44)$$

ここで、係数 R_{LBO} は次式により求めることができる。

$$R_{LBO} = \begin{cases} \min \left[\frac{7}{0.72B_f/t_f + 0.11B_w/t_w}, 21 t_w/B_w \right] & (\text{H 形鋼}) \\ 21 t/B & (\text{角形鋼管}) \end{cases} \quad (2.45)$$

ただし、上式において、下付き文字の f はフランジ、 w はウェブを表している。

熱変形に対する上限温度 T_{DP} は、次のように計算することができる。

$$T_{DP} = 20 + \frac{18,000}{\sqrt{A_{room}}} \quad (2.46)$$

ここで、 A_{room} は柱が面し、同時に火災となる室の床面積である。

2.9.2 梁の部材限界温度

梁の部材限界温度 $T_{cr,B}$ は、高温耐力によって定まる上限温度 T_{Bcr} 、熱変形に対する上限温度 T_{DP} 、継ぎ手等の弱点部に対する上限温度（550℃）の中の最小値をとるものとして、次のように表すことができる。

$$T_{cr,C} = \min[T_{Bcr}, T_{DP}, 550] \quad (2.47)$$

このうち高温耐力によって定まる上限温度 T_{Bcr} は、次のように表すことができる。

$$T_{Bcr} = 700 - \frac{750l^2(w_1 + w_2)}{M_{pB}(\sqrt{R_{B1} + R_{B3}} + \sqrt{R_{B2} + R_{B3}})^2} \quad (2.48)$$

ここで、 l は梁スパンの半分の長さ、 w_1 は梁に作用する等分布荷重、 w_2 は等分布荷重に変換した集中荷重、 M_{pB} は常温時における全塑性モーメント、 R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_{B3} は部材の拘束条件に関する係数である。これらのうち M_{pB} は、部材の常温時基準強度 F および強軸周りの塑性断面係数 Z_{pBx} を用いて次のように計算される。

$$M_{pB} = \frac{FZ_{pBx}}{1000} \quad (2.49)$$

また、 R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_{B3} は、表 2.17 に示す値を使用する。ただし、 Z_{pBy} は弱軸周りの塑性断面

係数である。

表 2.17 梁の拘束条件に関する係数 [2.22]

位置	記号	接合状態	数値
梁端部	R_{B1}, R_{B2}	剛接合	1
		その他	0
梁中央部	R_{B3}	上端が床スラブに緊結	1
		その他	Z_{pBy}/Z_{pBx}

2.9.3 不確実要因：収納可燃物密度，基準強度，弾性係数，軸力比

本研究では，損傷確率 $p_{C,C}$ および $p_{C,B}$ を左右する不確実要因として以下に示す変数を考慮し，確率分布に従う乱数を与えることでモンテカルロシミュレーションを行う。

- ・ 用途別収納可燃物密度 w
- ・ 基準強度 F
- ・ 弾性係数 E
- ・ 軸力比 p
- ・ モーメント比 q

このうち用途別の収納可燃物密度 w の扱いについては，2.8.3 項に示した通りである。残る 4 つの要因については以下のような扱いとする。

(1) 鋼材の基準強度 F および弾性係数 E

日本建築学会が刊行した設計規準によれば [2.26]，鋼材の基準強度 F および弾性係数 E は，表 2.18 に示す平均と標準偏差をとる。本研究では，両者が正規分布をとるものと仮定する。

表 2.18 常温時における鋼材の基準強度 F および弾性係数 E [2.26]

項目	鋼種	板厚 t (mm)	F (N/mm ²)	
			平均	標準偏差
基準強度 F	SS400	$2 < t \leq 6$	294.0	42.5
	SM400	$6 < t \leq 40$	273.4	35.6
弾性係数 E	SS400 SM490A	—	204,036	17,738

(2) 軸力比 p およびモーメント比 q

柱および梁に作用する常時荷重は，本来であれば架構条件によって変化する。しかし，これを考慮することは検証上の負担が大きいことから，実際の建築物の設計条件をもとに算

出された値に基づいて、表 2.19 のように軸力比 p およびモーメント比 q を与える．本研究では、両者が対数正規分布をとるものと仮定する．

表 2.19 常時荷重による軸力比 p とモーメント比 q

項目	平均	標準偏差
軸力比 p	0.09	0.08
モーメント比 q	0.05	0.08

軸力比 p およびモーメント比 q は、いずれも許容値に対する設計値の比を表している．軸力比 p は、そのままの値が式(2.42)および式(2.44)で利用される．これに対し、モーメント比 q は次式に従って梁に作用する等分布荷重 $w_1 + w_2$ に換算する必要がある．

$$q = \frac{w_1 + w_2}{4M_{pB}} \quad (2.50)$$

2.10 事象⑧：隣棟延焼

建築物の延焼防止性能は、当該建築物の内部で発生した火災によって周辺の別の建築物に着火することを防止する性能（加害防止性能）と、周辺の別の建築物で発生した火災により当該建築物が着火することを防止する性能（受害防止性能）の 2 つの性能に分けて考えることができる．本来であれば、これら双方を評価できることが望ましいが、後者については、今後の検討課題とし、本研究では前者のみを考慮することとする．

また、火災の影響が及ぶ周辺の別の建築物の中には、数 m 程度と隣接敷地の比較的近い場所にある建築物から、数十、数百 m 程度と遠く離れた場所にある建築物まで、様々な位置関係にある建築物が含まれる．前者に対しては、火源からの放射および飛び火の双方の影響を考慮する必要があるのに対し、後者に対しては、火源からの放射の影響が小さくなるため、飛び火の影響のみを考慮すればよくなる．飛び火は、火災の大規模化をもたらす現象であるが、現時点では、その影響の大きさを当該建築物の性能に完結させた評価が難しいことから、本研究では評価の対象としない．

したがって本事象では、当該建築物が火災となった場合に、放射によって隣接敷地に建つ建築物に延焼する確率 p_{FS} を評価する．なお、公園などのように半ば恒久的にその状態が維持されることが見込まれる土地とは異なり、通常土地に建つ建築物の条件は時間の経過とともに変化しうる上、防火上の性能もまちまちである場合が少なくない．こうした相隣条件の変化や差異が建築物単体に対する性能評価に反映させることは不合理であることから、ここでは隣接敷地側の建築物について以下に挙げるような条件を仮定する．

- ・ 隣接建築物は当該建築物が建つ敷地の境界に外壁面を接して建っている．

- ・ 隣接建築物の外周に可燃性の材料は使用されていない。
- ・ 隣接建築物の外壁面上の開口部には防火設備（耐火時間 20 分）が設けられている。

これは隣棟延焼過程における想定シナリオに相当するものである。得られる延焼確率 p_{FS} はこの想定シナリオに特有のものであり、別の想定シナリオの下で得られる p_{FS} とは一致しない場合がある点には留意が必要である。外周に可燃性の材料が使用されていない建築物が外部火源から放射を受けた場合には、開口部の窓ガラスが破損・脱落した後に建築物内部の可燃物に着火する形で延焼が起こることが多い。すなわち、放射加熱による窓ガラス（防火設備）の破損・脱落を隣棟延焼の発生条件とみなすことができる。なお、軒裏へ着火した炎が小屋裏へ侵入するなど、開口部の窓ガラスの破損・脱落以外にも隣棟延焼の発生形態は考えられるが、いずれも当該建築物からの放射の強さに依存して発生確率が変わると見なせることから、当該建築物の加害防止性能の評価は、開口部の窓ガラスの破損・脱落の評価で代表される。ここでは、防火設備の破損・脱落をその温度に基づいて判定することとし、標準加熱曲線に従う加熱を 20 分間受けた防火設備の温度（性能保持限界温度） T_X と、当該建築物に隣接する建築物の外壁開口部に設けられた防火設備の火災終了時点における温度（火災終了時温度） T_X^* の大小関係に基づき、次式のように延焼確率 p_{FS} を評価する（図 2.9）。

$$p_{FS} = \Pr(T_X \leq T_X^*) \quad (2.51)$$

ただし、防火設備は比較的薄く、比較的少ない種類の材料から作られている場合が多いことを考慮し、放射シールドの考え方に基づいて次式のように T_X と T_X^* を計算する。

$$T_X = \left\{ \frac{T_{ISO}^4 + T_{\infty}^4}{2} \right\}^{1/4} \quad (2.52)$$

$$T_X^* = \left\{ \frac{\dot{q}_X'' / \sigma + T_{\infty}^4}{2} \right\}^{1/4} \quad (2.53)$$

ここで、 T_{ISO} は加熱開始から 20 分が経過した段階での標準加熱温度、 T_{∞} は雰囲気温度、 $\dot{q}_X''$ は当該建築物の火災区画から隣接建築物に入射する放射熱流束、 σ はステファン・ボルツマン定数である。

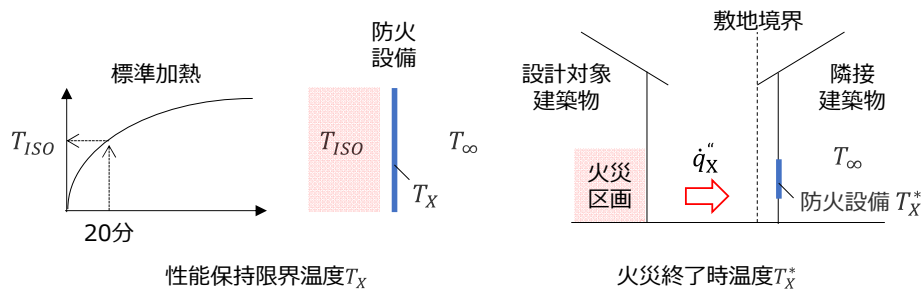


図 2.9 性能保持限界温度と火災終了時温度の関係

2.10.1 火災区画からの放射熱流束

式(2.52)には未定係数は含まれていないため、性能保持限界温度 T_X は定数として扱うことができる。これに対し式(2.53)を利用した火災終了時温度 T_X^* の計算には、入射熱流束 $\dot{q}_X''$ の値が必要となるが、これは、当該建築物の火災性状や敷地境界までの距離などの条件に依存する。入射熱流束 $\dot{q}_X''$ は、図 2.10 に示すように、火災区画の開口部を火源とする放射熱流束 $\dot{q}_{X,1}''$ と開口噴出火炎を火源とする放射熱流束 $\dot{q}_{X,2}''$ の和として計算することができる。

$$\dot{q}_X'' = \dot{q}_{X,1}'' + \dot{q}_{X,2}'' \quad (2.54)$$

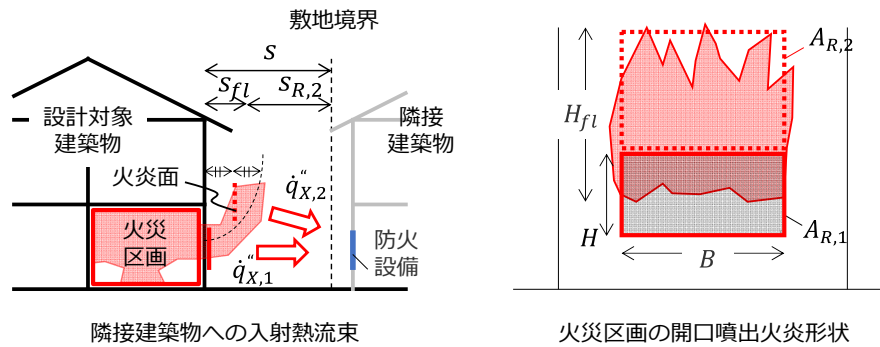


図 2.10 火災区画から放射され隣接建築物の外壁開口部へ入射する熱流束

(1) 開口部からの加熱

開口部を火源とする放射熱流束 $\dot{q}_{X,1}''$ は、耐火性能検証法 [2.22] に示された手続きに従って計算した火災区画温度 $T_{X,1}$ に応じた放射熱流束に、隣接建築物の防火設備から見た設計対象建築物の開口部（火源面）の形態係数 $F_{X,1}$ を乗じて計算する。

$$\dot{q}_{X,1}'' = \sigma T_{X,1}^4 \cdot F_{X,1} \quad (2.55)$$

ただし、火源面は黒体であることを仮定している。

形態係数 $F_{X,1}$ は、防火設備と火源面の幾何学的関係により決定されるが、解析的な計算式を利用可能な条件は限られる上、仮に利用可能であっても、計算手続きが煩雑となる場合が少なくない。そこで、火源面は円形で、かつ隣接建築物の防火設備が火源面に対して正対する位置にあるものと仮定することで、計算手続きの簡略化を図ることとし、次のように $F_{X,1}$ を計算する。

$$F_{X,1} = \frac{A_{R,1}}{A_{R,1} + 2\pi s^2} \quad (2.56)$$

ここで、 $A_{R,1}$ は火源面の面積、 s は火源面から敷地境界までの直線距離である。以上のように

な仮定の下で得られる $F_{X,1}$ は、同じ敷地境界面上の様々な位置にある防火設備から見た $F_{X,1}$ の中でも最大のものであり、計画上は安全側の評価につながる。

(2) 開口噴出火炎からの加熱

開口噴出火炎を火源とする放射熱流束 $\dot{q}_{X,2}''$ についても、 $\dot{q}_{X,1}''$ の場合と同様、火源からの放射熱流束に、隣接建築物の防火設備から見た設計対象建築物の開口噴出火炎（火源面）の形態係数 $F_{X,2}$ を乗じて計算する。

$$\dot{q}_{X,2}'' = \frac{\chi_R \dot{Q}}{\sum A_{R,2}} \cdot F_{X,2} \quad (2.57)$$

ただし、放射熱流束 $\dot{q}_{X,2}''$ は、開口部からの加熱の場合とは異なり、開口噴出火炎の実質的な発熱速度 $\dot{Q}$ にその放射失熱割合 $\chi_R (\cong 0.3)$ を乗じたものを、火源の総表面積 $\sum A_{R,2}$ で除すことで求める。

開口噴出火炎の実質的な発熱速度 $\dot{Q}$ は、換気によって区画外に持ち出される高温ガスの保有熱エネルギーに、区画内で燃焼しきれなかった未燃ガスの区画外での燃焼分を加算して次のように計算することができる。

$$\dot{Q} = c_p \dot{m} \Delta T + \Delta H_c \left(\dot{m}_B - \frac{\dot{m}}{\gamma} \right) \quad (2.58)$$

ここで、 c_p は高温ガスの比熱、 $\dot{m}$ は換気速度、 ΔH_c は未燃ガスの燃焼熱、 $\dot{m}_B$ は火災区画における可燃物の燃焼速度、 γ は空気燃料比である。第1項は換気による持ち出し分を、第2項は未燃ガスの区画外での燃焼分をそれぞれ表している。

形態係数 $F_{X,2}$ の計算にあたっては、開口部からの加熱の場合と同様の仮定を設ける。すなわち、火源面は円形で、かつ隣接建築物の防火設備が火源面に対して正対する位置にあるものと仮定する。この場合の $F_{X,2}$ は、式(2.56)と同じく次のように計算できる。

$$F_{X,2} = \frac{A_{R,2}}{A_{R,2} + 2\pi s_{R,2}^2} \quad (2.59)$$

ここで、 $A_{R,2}$ は火源面の面積、 $s_{R,2}$ は火源面から敷地境界までの直線距離である。

開口噴出火炎からの加熱が開口部からのそれと異なる点は、区画内部の火災状況により、火源面の形状および位置が変化する点である。火源面の面積 $A_{R,2}$ は、開口幅を B 、開口高さを H 、開口噴出火炎の中性帯より上の高さを H_{fl} とした場合、次のように表される。

$$A_{R,2} = B \left(H_{fl} - \frac{H}{2} \right) \quad (2.60)$$

ただし、簡単のため、開口部のちょうど中間の高さに中性帯が位置しているものと仮定して

いる．開口噴出火炎高さ H_{fl} の計算には，模型実験の結果を回帰して得られた次式を利用する [2.27]．

$$\frac{H_{fl}}{(A\sqrt{H})^{2/5}} = 2 \left(\frac{\dot{Q}}{c_p \rho_{\infty} T_{\infty} g^{1/2} A \sqrt{H}} \right)^{0.44} \quad (2.61)$$

ここで， A は開口部面積， ρ_{∞} は外気密度， T_{∞} は外気温度， g は重力加速度である．

また，開口部から火炎が噴出すれば，隣接建築物に対してより火源が接近することになるため，仮に外壁面に沿って火源面が形成されるとして放射熱流束 $\dot{q}_{X,2}''$ を計算すれば，実態を過小評価することになる．ただし，開口部から噴出した火炎は，必ずしも鉛直方向には上昇せず，通常は，外壁面からの距離を広げて，湾曲した軌跡を描きながら上昇する．こうした平面的ではない火源面からの放射熱流束の計算は手続きが煩雑となるため，ここでは開口噴出火炎の先端と外壁面の水平方向の中心に，外壁面と平行な火源面が形成されるものと仮定する（図 2.10）．すなわち，火災区画から敷地境界までの直線距離を s ，開口噴出火炎の先端と外壁面との間の水平方向距離を s_{fl} とした場合，火源面から敷地境界までの距離 s_R は次式のように表される．

$$s_R = s - \frac{s_{fl}}{2} \quad (2.62)$$

ただし，水平方向距離 s_{fl} の計算には，横井による実験式を簡略化した次式を使用する [2.24, 2.28]．

$$\frac{s_{fl}}{H} = \left(\frac{H_{fl}}{4.9H} \right)^{1/3} \quad (2.63)$$

すなわち，開口高さ H が高く，火炎高さ H_{fl} が高いほど，より遠方に火炎が到達することを表している．

2.10.2 不確実要因：外壁開口部の位置

式(2.51)において比較を行う T_X と T_X^* のうち，防火設備の性能保持限界温度 T_X は，標準加熱という規格化された加熱の下での部材温度であることから，概ね一定の値をとるとみなせる．これに対し，防火設備の火災終了時温度 T_X^* は，例えば，隣接建築物の外壁開口部の向きや位置などの条件に左右され，当該建築物側の条件だけでは定まらない．本研究では，こうした不確実要因の中でも，特に影響が大きいと考えられる外壁開口部の位置のばらつきを考慮することで，確率的に T_X^* を評価して，式(2.51)の延焼確率 p_{FS} の計算に反映させる．火災区画と被加熱建物の外壁開口部位置の食い違いを考慮した火災終了時温度 T_X^* が対数正規分布に従うとみなせば， p_{FS} は標準正規分布の累積分布関数 Φ および信頼性指標 β_{FS} を用いて以下のように表される．

$$p_{FS} = 1 - \Phi(\beta_{FS}) \cong 1 - \frac{1}{1 + \exp(-1.7\beta_{FS})} \quad (2.64)$$

$$\beta_{FS} = \frac{\ln T_X^* - \lambda_X}{\xi_X} \quad (2.65)$$

ここで、 λ_X と ξ_X は、それぞれ次のように定義される対数正規分布のパラメータである。

$$\lambda_X = \ln \frac{T_X^*}{\sqrt{1 + (\sigma_X/\mu_X)^2}} \quad (2.66)$$

$$\xi_X = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_X}{\mu_X} \right)^2 \right]} \quad (2.67)$$

上式において火災終了時温度 T_X^* を定数と見なせば、 λ_X と ξ_X は火災終了時温度 T_X^* の変動係数 σ_X/μ_X により決定される。

図 2.11（左）は、当該建築物の火災区画と隣接建物の外壁開口部の離隔距離 s および水平方向のずれ d が、隣接建築物の防火設備への入射熱流束 $\dot{q}_X''$ 、さらには防火設備の火災終了時温度 T_X^* に及ぼす影響を模式的に描いたものである。 $\dot{q}_X''$ および T_X^* の値は、 s が大きくなるに従って小さくなる。また、火災区画の正面に位置する場合（ $d = 0$ ）に最大となり、 d が大きくなるに従って小さくなる。ここで、隣接建築物の外壁開口部の存在確率が、外壁面上において偏らないものと仮定して、数値的に火災終了時温度 T_X^* の変動係数 σ_X/μ_X を計算した結果を図 2.11（右）に示す。ただし、この計算では、一定の火源面積 A と離隔距離 s の組み合わせの下で、水平方向のずれ d を無作為に変化させたモンテカルロシミュレーションを行った。変動係数 σ_X/μ_X は、 A と s の双方の大きさに応じて変化した。が、 A が大きくなるに従って σ_X/μ_X の変化率が小さくなることに着目し、本研究では、次に示す $A = 10\text{m}^2$ の場合の回帰結果を

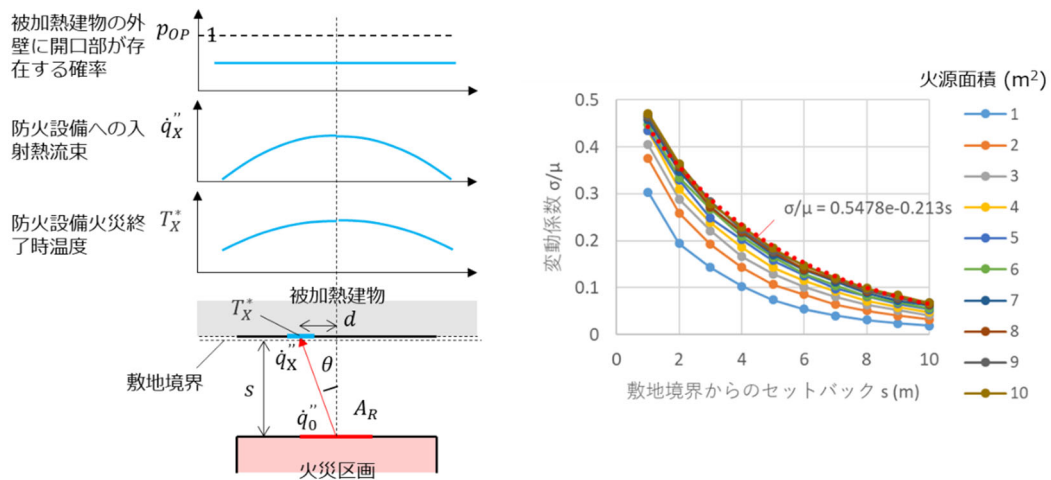


図 2.11 火災終了時温度 T_X^* の変動係数 σ_X/μ_X

採用することとした。

$$\frac{\sigma_X}{\mu_X} = 0.548 \exp(-0.213s) \quad (2.68)$$

ただし本回帰式については、 s だけではなく、 A を変数として加えた形式とする方がより合理的な評価を行えるようになるものと考えられる。

2.11 まとめ

本章では、総合的なリスク評価の考え方に基づいて、建築物の防火性能を評価する方法を整備した。2.3 節以降では、イベントツリーの各事象の発生確率のモデル化を行ったが、その内容は、限界条件と評価関数の評価に関する基本的な枠組みの整備に留まっており、評価可能な建築仕様の対象範囲は限定的である。今後、より一般性の高い防火性能評価を行うには、各事象の発生確率の定式化の方法を改良していく必要がある。

なお、出火率、収納可燃物の火災成長率、同じく密度、在館者密度、消火活動の奏効率など、火災性状を左右する一部のパラメータの値は統計データに基づいて設定してある。これらは、いずれも建築物の維持管理の状態に左右されるものであり、本来は建築物によって様々であるはずだが、消火活動の奏効率を除き、用途に共通の値を設定することになっている。しかし、建築物の維持管理状況の改善を促す上では、実態に応じた値を設定できるようにすることも考えられる。

参考文献

- 2.1) 日本建築センター：建築物火災安全性評価要領
- 2.2) 青木・藤井・木下：防災計画についてのエキスパートジャッジのモデル化，日本建築学会計画系論文集，Vol. 66，No. 546，pp. 149-154，2001.
- 2.3) 村田・掛川・石川・矢代・飯島・坪川：チェックシートによる事業所の地震火災安全性評価，日本建築学会技術報告集，Vol. 8，No. 15，pp. 143-146，2002.
- 2.4) 松山・城・山口・田村・北堀：建築物の火災安全性評価システムの提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.105-106，2021.
- 2.5) 日本建築学会：建築物の火災安全設計指針，丸善，2002.
- 2.6) 日本建築学会：火災安全設計の原則，丸善，2013.
- 2.7) 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.
- 2.8) 日本建築センター：新・建築防災計画指針—建築物の防火・避難計画の解説書，1995.

- 2.9) 辻本・遊佐・竹市：火災安全性の工学的評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.117-120，1999.
- 2.10) 竹市・萩原・原田・辻本：建築基準法改正による耐火建築物の性能規定化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.255-256，2000.
- 2.11) 京都市消防局：「京都アニメーション火災」における避難行動の分析結果について，2019.
- 2.12) 大阪市北区ビル火災を踏まえた今後の防火・避難対策等に関する検討会：大阪市北区ビル火災を踏まえた今後の防火・避難対策等に関する検討会報告書，2022.
- 2.13) Ota H, Himoto K, Ohmiya Y. Cross-occupancy analysis of the cost-effectiveness of fire safety measures for buildings, Fire Safety Journal.
- 2.14) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：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.
- 2.15) Zukoski EE, Kubota T, Cetegen B. Entrainment in fire plumes, Fire Safety Journal 3: 107-121, 1980/1981.
- 2.16) Deguchi Y, Himoto H. Hierarchical Bayesian estimation of fire growth rate for various building usages based on the Fire Incidents Report, PSAM 16, 2022.
- 2.17) 火災報告，総務省消防庁，1995-2019.
- 2.18) 掛川：火災シナリオに基づく避難安全性評価手法に関する研究，名古屋大学学位論文，1997.
- 2.19) 池畠・仁井・山口・田中・出口：避難安全評価のためのスプリンクラー設備の作動信頼性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.27-30, 2012.
- 2.20) 建設大臣官房技術調査室監修：建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法，日本建築センター，1989.
- 2.21) 樋本・糸井川・岩見：相対リスクに基づく建築物の延焼防止性能検証，日本建築学会環境系論文集，Vol.84，No.764，pp.883-891，2019.
- 2.22) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001 年版耐火性能検証法の解説及びその計算例とその解説，井上書院，2001.
- 2.23) Harada K, Kogure R, Matsuyama, Wakamatsu T. Equivalent fire duration based on time-heat flux area, Proc. 4th AOFST, pp. 513-524, 2000.
- 2.24) 横井：建築物の火災気流による延焼とその防止に関する研究，東京大学学位論文，1960.
- 2.25) 鈴木・石原・大宮・河野・松山・若松：火災時における鋼構造部材の信頼性解析，構造工学論文集，Vol.48B，2002.
- 2.26) 日本建築学会編：鋼構造限界状態設計規準（案）・同解説，1990.

- 2.27) Tang F, Hu LH, Delichatsios MA, Lu KH, Zhu W. Experimental study on flame height and temperature profile of buoyant window spill plume from an under-ventilated compartment fire, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55: 93-101, 2012.
- 2.28) 田中：第3版 建築火災安全工学入門，日本建築センター，2020.

3. 火災被害を受けた建築物の機能維持性能

2章では、建築物の防火性能を位置付けるために、総合的なリスク評価の枠組みを導入した。同枠組みにおいて、建築部の防火性能は7つの異なる個別性能から構成され、それらを代表する被害指標を利用して、ある条件を基準とする相対的な状態を表示できるようにした。個別性能を代表する被害指標の多くは、総合的なリスク評価のためのイベントツリーを整備する過程で定式化されたが、火災被害を受けた建築物の機能維持性能については手続きが定まっていなかった。そこで本章では、機能維持性能の定式化を行うとともに、これを左右する諸事象について検討を行った結果をまとめる。

3.1 機能維持性能の定式化

図 3.1 は、ある建築物の供用期間中の機能率 $F(t)$ (0~1)の時間変化を模式的に示している。火災前の建築物の機能率 $F(t)$ は1だが、火災が発生すると焼損した部分が使用不能となり、建築物としての機能率 $F(t)$ は、被害率 D だけ低減した $1 - D$ となる。建築物の被害の程度が深刻であればそのまま解体されるが、復旧可能と判断されれば作業が進められ、一定期間の後に全面復旧、または再使用可能となった部分から徐々に供用再開していき、最終的に機能率 $F(t)$ は当初の値である1に戻る。本研究では、建築物もしくは地域の地震に対するレジリエンスの定義 [3.1] を参考に、ある建築物の供用期間中の機能の時間累計（供用期間機能）が、火災被害による低減を経ても、なお保持されている割合を火災後の機能維持性能 R と定義する。

$$R = \int_{t_0}^{t_L} \frac{F(t)}{t_L - t_0} dt \quad (3.1)$$

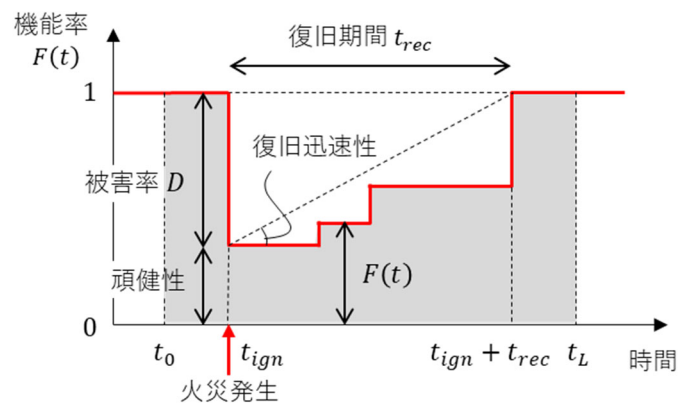


図 3.1 火災被害を受けた建築物の機能率の時間変化

ここで、 t_0 は分析開始時点、 t_L は分析終了期間である。 t_{ign} は火災発生時点、 t_{rec} は火災発生から復旧するまでに要する期間である。なお、建築物は複数の区分に分けて使用される場合があり、関係する者の立場によって機能維持性能 R の意義が異なる場合がある（例えば、建築物の所有者と建築物に入居するテナントの違い）、本検討では、テナントによる利用は考慮せず、建築物の所有者が使用者に一致しているものと仮定する。また、火災による被害が大きい場合には、当該建築物の改修あるいは建て替えによる復旧をあきらめ、別の既存建築物に転居することで機能継続・再開を図る場合もあるが、本検討ではこうした形の復旧を想定しない。

(1) 機能率

建築物の機能率 $F(t)$ は、建築物全体の状態を表す変数である。建築物内で発生する火災は、建築物を構成する区画ごとに独立して成長し、それによってもたらされる被害の程度も区画により異なるものと考えられる。そこで、機能率を区画単位で評価した上で、これに当該区画の機能上の重要度を重み付けすることで、次のように建築物の機能率 $F(t)$ を計算する。

$$F(t) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i f_i(t)}{N} \quad (3.2)$$

ここで、 N は建築物内の区画数、 i は区画の識別子、 w_i は当該区画の機能上の重要度に応じた重み付け係数（ $\sum_{i=1}^N w_i = N$ ）、 $f_i(t)$ は区画 i の機能率である。ただし、区画 i の機能率 $f_i(t)$ は、使用可能な状態にある場合は1、使用不能な状態にある場合には0をとるものとし、次のように表すこととする。

$$f_i = \begin{cases} 1 & (t < t_{ign}) \\ 0 & (t_{ign} \leq t \leq t_{ign} + t_{rec,i}) \\ 1 & (t_{ign} + t_{rec,i} < t) \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで、 $t_{rec,i}$ は区画 i の復旧期間とする。

(2) 区画の復旧期間

本研究では、建築物の機能率 $F(t)$ を、建築物を構成する個々の区画の復旧期間 $t_{rec,i}$ に基づき評価する。建築物を構成する部材は、機能上の違いや、火災被害を受けた場合の復旧作業の工程の違いを考慮して、構造部材 S （柱、梁、壁、床など）、非構造部材 NS （内装、簡易間仕切り壁）、設備 E （電気、衛生、空調、照明など）、収納物 F （什器、物品など）に大別されるものとする。建築物内の区画が使用可能な状態となるには、特定の部材・物品だけではなく、全てが復旧している必要がある。ここではこうした復旧要件を考慮して、区画 i の復旧期間 $t_{rec,i}$ を次のように評価する。

$$t_{rec,i} = \max\{t_{rec(S),i} + t_{rec(NS),i} + t_{rec(E),i} + t_{rec(F),i}, t_{rec(R),i}\} \quad (3.4)$$

すなわち、区画の復旧は、構造部材 S 、非構造部材 NS 、設備 E 、収納物 F に関する作業が直列的に進められるものと仮定する。本来であれば、並列的に進められる作業があることを考慮すれば、 $t_{rec,i}$ は実態を過大に評価するものと考えられ、今後、必要に応じて改良する必要がある。なお、 $t_{rec(R),i}$ は区画 i が稼働するための前提となる他の区画（例えば、当該区画に至る階段室やトイレなど）が復旧するまでに要する時間を表している。

式(3.4)に示した各復旧時間を評価するには、建築物内でどのような火災が発生するのかを把握した上で、どの範囲に対して、どの程度の被害が及ぶのかを評価する必要がある。ただし、建築物を構成する個々の区画で発生する火災を特徴付ける条件は、区画形状や開口形状など、設計段階で確定することができる条件だけでなく、竣工後に区画内に持ち込まれる可燃物の種類や量、スプリンクラー設備や排煙設備などの防火関連設備の作動信頼性、火災となった場合に消火活動にあたる在館者の行動など、不確定な条件が多く、各区画で発生する火災の性状を一意に定めることができない。このため、復旧期間の評価には、関連する不確定要因の影響を考慮した確率的な評価が必要である。こうした不確定要因を考慮すれば、区画 i を構成する各部材が物理的に使用可能な状態に復旧するまでに要する時間 $t_{rec(x),i}$ は、次式により求めることができる。

$$t_{rec(x),i} = \int_t t(D_{(x)i}) \cdot p(D_{(x)i} | t_{fire,i}^*) \cdot p(t_{fire,i}^*) dt_{fire}^* \quad (x = S, NS, E, F) \quad (3.5)$$

ここで、 t_{fire}^* は火災外力の強さを代表する等価火災継続時間、 $p(t_{fire}^*)$ は区画内で発生する火災の等価火災継続時間が t_{fire}^* となる確率、 D は火災による被害率、 $p(D | t_{fire}^*)$ は等価火災継続時間 t_{fire}^* の間だけ加熱を受けた場合の被害率 D の確率密度分布、 $t(D)$ は被害程度が D であった場合の復旧期間を表している。ただし、等価火災継続時間 t_{fire}^* は、火災外力が区画の条件によって異なることを考慮するため、区画内での火災継続時間 t_{fire} を、標準加熱曲線による加熱に相当する時間に換算したものである。また、 $t(D)$ には、実際の作業に要する時間だけでなく、物品の調達に要する時間も含まれる。これに対し、当該区画の復旧の前提となる他の区画の復旧期間 $t_{rec(R),i}$ は、建築物内の区画同士の接続関係などに応じて個別に決定する必要がある。

3.1.1 火災シナリオに基づく区画の復旧期間の評価

式(3.5)では、区画の復旧時間 $t_{rec(x),i}$ を、被害程度が D となる場合の復旧期間 $t(D)$ に対して、そうした火災の発生確率 $p(D_{(x)i} | t_{fire,i}^*) \cdot p(t_{fire,i}^*)$ を重み付けたものとして定義している。 $t_{rec(x),i}$ を求めるには、モンテカルロシミュレーションなどの数値的な手続きに従って、可能性のある全ての確率変数 $t_{fire,i}^*$ について評価を行ったものを集計することも可能である。しかし、本研究では、区画内で想定される火災をいくつかの代表的なシナリオに集約すること

で議論を単純化させる．図 3.2 は，区画内で発生した火災が成長する過程を，イベントツリーで表したものである．ここでは，火災の成長を防止する要因として，スプリンクラー設備，在館者による消火活動，消防隊による消火活動の 3 つの事象を考慮しており，区画内での出火の是非を含めて，計 5 つの火災シナリオを想定している．5 つの火災シナリオは，発生確率が異なるのみならず，等価火災継続時間 t_{fire}^* ，被害率 D ，復旧期間 t_{rec} がそれぞれ異なるため，火災後の機能率も異なる時間経過をたどる．

着目する区画での火災の発生は，当該区画において最初に火災が発生する場合と，他の区画で出火した火災が内部延焼により当該区画に至る場合に分けて考えることができる．ここでは，2 章での議論と同様，前者を「出火」，前者および後者を「火災発生」として，呼称を使い分ける．このうち，着目する区画での出火は，基本的に，当該区画の条件のみにより，その発生確率を評価することができる．一方，他の区画で出火した火災が，内部延焼により当該区画に至ることにより発生する火災は，区画間の連続的な延焼の過程を評価する必要があるため，建築物の規模によっては考慮すべき延焼の経路が膨大な数に上る可能性がある．本来であれば，区画間の連続的な延焼の影響は無視できるものではないが，ここでは，

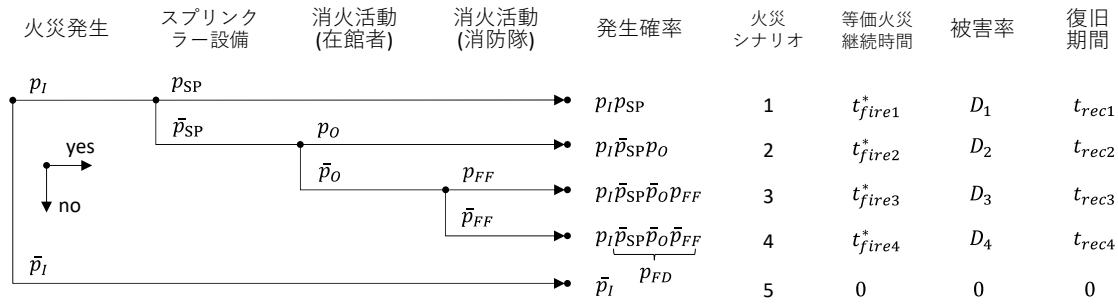


図 3.2 区画ごとの火災シナリオを決定するためのイベントツリー

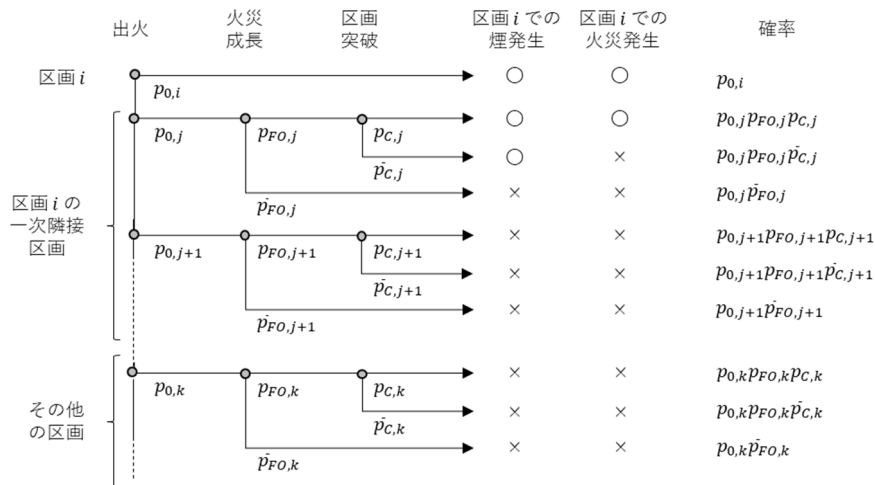


図 3.3 区画 i で煙が進入または火災が発生する確率（図 2.4 の再掲）

隣接する区画との間が一定以上の性能の壁や防火設備で区切られた区画単位の評価を行うことを前提に、ある区画*i*における火災の発生が、「自区画での出火」もしくは「自区画に直接隣接する区画（一次隣接区画）で出火した火災の延焼」のいずれかによって起こるものと仮定する（図 3.3）。この場合、区画*i*における火災発生確率 $p_{I,i}$ は次式により計算できる。

$$p_{I,i} = p_{0,i} + \sum_{j=1}^{M_i} p_{0,j} p_{FO,j} p_{BT,j} \quad (3.6)$$

ここで、 M_i は一次隣接区画の数、 j は一次隣接区画、 p_0 は出火確率、 p_{FO} は区画内での全面火災となる確率、 p_{BT} は隣接する区画へ延焼する確率を表している。

(1) 区画内での出火

一般に、式(3.6)に含まれる出火確率 p_0 は、着目する建築物において、単位供用期間内に想定される出火件数として定義されることが多い。しかし、その影響については、総合的なリスク評価の枠組みの中で、既に該当する事象の発生確率として組み込まれている（2章参照）。そこで、機能維持性能の評価にあたっては、建築物内部のいずれかの区画で1件の火災が発生すると仮定した上で、建築物を構成する個々の区画の出火の潜在的な危険性が、区画床面積 A_{flr} に比例しているものと考え、次のように p_0 を計算する。

$$p_{0,i} = \frac{A_{flr,i}}{\sum_{j=1}^N A_{flr,j}} \quad (3.7)$$

ただし、 N は総区画数、下付き文字の*i*および*j*は区画の識別子である。

(2) 区画内での火災成長

区画内で発生した火災は、出火源の位置や大きさなどによっては拡大せず、結果的に小火に留まる状況も考えられるが、本研究では、全てが全面火災に発展するものと仮定する。ただし、所定の規格を満たしたスプリンクラー設備が作動した場合、在館者により消火活動が行われた場合、消防隊により消火活動が行われた場合のいずれかの場合においては、それぞれの消火能力と、消火が開始された時点における火災の規模の大小関係に基づき、火災を消し止めることができる場合があるものとする。すなわち、区画*i*で発生した火災が全面火災となる確率 $p_{FO,i}$ は、スプリンクラー設備、在館者による消火活動、消防隊による消火活動のいずれもが失敗する確率として、次のように求めることができる。

$$p_{FO,i} = \bar{p}_{SP,i} \bar{p}_{O,i} \bar{p}_{FF,i} \quad (3.8)$$

これらの事象は、火災時において相乗的な効果を持つ場合もあるが、本研究では独立を仮定し、それぞれ次のように表すこととする。

$$\text{スプリンクラー設備による散水：} \bar{p}_{SP,i} = 1 - p_{AC(SP),i} p_{EX(SP),i} \quad (3.9)$$

$$\text{在館者による消火活動：}\bar{p}_{O,i} = 1 - p_{AC(O),i}p_{EX(O),i} \quad (3.10)$$

$$\text{消防隊による消火活動：}\bar{p}_{FF,i} = 1 - p_{EX(FF),i} \quad (3.11)$$

ここで、 $p_{AC(SP)}$ はスプリンクラー設備が火災の発生を受けて正常に作動する確率、 $p_{EX(SP)}$ はスプリンクラー設備が作動した場合に奏功する確率、 $p_{AC(O)}$ は在館者が火災の発生を受けて消火活動を開始する確率、 $p_{EX(O)}$ は在館者による消火活動が奏功する確率、 $p_{EX(FF)}$ は消防隊による消火活動が奏功する確率を表している。これらの各変数の値は、建築物の条件や、発生した火災の条件などによっても左右されるものではあるが、ここでは統計データに基づいて決定する。

スプリンクラー設備による消火については、火災報告による物販店舗および事務所における火災事例の分析例があり、作動確率 $p_{AC(SP)}$ が 0.91、奏功確率 $p_{EX(SP)}$ が 0.67 となることが報告されている [3.2]。ただし、同報告では、焼損床面積が 1m^2 未満となった場合に、スプリンクラー設備が奏功したものと判定している。

在館者（消防隊、消防団以外）による初期消火についても、同じく火災報告データに概要の記載がある。消火活動を開始した時間までは不明であるものの、初期消火が行われたのかどうか、初期消火が行われた場合の使用機材、火勢鎮圧に効果があったのか否かを確認することができる。図 3.4 は、1995 年から 2014 年に及ぶ 20 年間の火災報告の記録をもとに、在館者による消火活動の成否を整理したものである [3.3]（2 章と 3 章で、関連する分析を行った時期が異なるため、火災報告の対象期間が異なっている）。用途によってその状況は大きく異なるが、例えば事務所建築物の場合であれば、消火活動が開始される確率 $p_{AC(O)}$ は 0.555、これにより消火活動が奏功する確率 $p_{EX(O)}$ は 0.616 となることが確認できる。

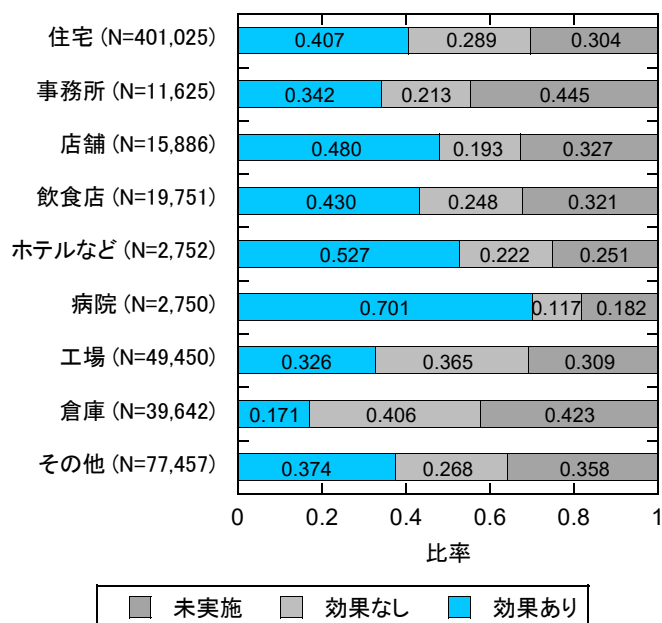


図 3.4 在館者による消火活動の奏功率

消防隊による消火活動については、スプリンクラー設備による散水や在館者による初期消火活動のように、必ずしも火災のごく初期の段階から散水・放水が行われるとは限らないため、その成否を、焼損床面積などの火災報告の記録のみから判断することが難しい。そこで、消防隊による消火活動の奏功確率 $p_{EX(FF)}$ の評価にあたっては、消防隊が消火活動を開始する時間 t_{FF} と、火災が全面火災となることを阻止できる限界時間 $t_{FD,i}$ の大小関係に基づいて決定する。図 3.5 は、1995 年から 2014 年に及ぶ 20 年間の火災報告の記録をもとに、消防隊の消火活動開始時間 t_{FF} の頻度分布を描いたものである。これによると、分布は左右非対称で、右側に長い裾野が広がっており、赤い実線で示す対数正規分布（平均 19.7 分、標準偏差 13.3 分）による近似が可能と考えられる（橙の実線は火災報告の記録に基づく累積分布、橙の点線は同じく対数正規分布による近似結果を表す）。これに対し、成長阻止限界時間 $t_{FD,i}$ は、火災規模の成長速度だけでなく、消防隊の消火活動能力に関する条件や、区画の延焼防止性能などに関する条件にも依存するものであるが、ここでは簡単のため、一意の値をとるものと仮定する。この場合、消防隊による消火活動の奏功確率 $p_{EX(FF)}$ は、次式により求めることができる。

$$p_{EX(FF),i} = \Pr(t_{FF} < t_{FD,i}) = \int_0^{t_{FD,i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_{FF}t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \lambda_{FF})^2}{2\xi_{FF}^2}\right\} dt \quad (3.12)$$

ここで、 λ_{FF} と ξ_{FF} は対数正規分布の変数である。図 3.5 には、消防隊が他への延焼を許さずに消し止めることのできる発熱速度の上限 $\dot{Q}_{B,cr}$ を、仮に、1MW、10MW、100MW とした場合の、成長阻止限界時間 $t_{FD,i}$ を示してある。ただし、出火後の火災の発熱速度は、時間の自乗に比例して成長するものと仮定している。

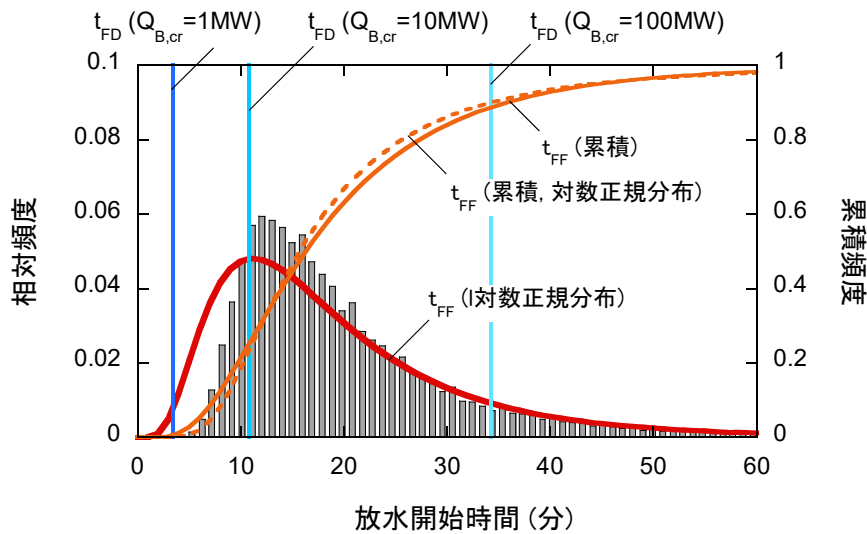


図 3.5 出火から消防隊による放水が開始されるまでの時間。

$$\alpha t_{FD,i}^2 = \dot{Q}_{B,cr} \text{ (MW)} \quad (3.13)$$

ここで、 α は火災成長率である。なお、火災成長率 α は、用途ごとに対数正規分布で近似できることを前章で示したが、図 3.5 には、このうち事務所建築物の平均値 $0.0238 \times 10^{-3} \text{ (MW/s}^2\text{)}$ を採用した場合の結果を示している。

(3) 区画の突破

火災成長の防止に失敗した火災は、全面火災となって、区画の周壁・扉を加熱する。周壁・扉は、火災を区画内部に閉じ込める役割を果たしているが、損傷が進行すると、最終的に突破され、隣接する区画への延焼につながる。一般に、周壁・扉等の部材の耐火性能は、部材が標準加熱に曝された場合の性能保持時間 t_R によって代表される。すなわち、標準加熱に対する暴露時間が、部材突破の判定条件となる。ただし、区画内で火災が発生した場合の実際の加熱は標準加熱とは異なるため、部材の性能保持時間 t_R と実際の火災継続時間 t_{fire} の単純な大小比較で部材突破を判定することはできない。部材突破の判定には、実際の火災が t_{fire} だけ継続した場合の加害性に、標準加熱による加害性が等価となる火災継続時間 t_{fire}^* を、 t_{fire} の代わりに利用する必要がある。ここで、 t_{fire}^* が、建築物内の収納可燃物密度の実態調査の結果を踏まえて対数正規分布をとるものとすれば [3.4]、性能保持時間 t_R の部材が突破され、隣接する区画に延焼する確率 p_{BT} は、次式により表すことができる。

$$p_{BT,i} = \Pr(t_{fire,i}^* > t_{R,i}) = 1 - \int_0^{t_{R,i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_{fire,i}^* t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \lambda_{fire,i}^*)^2}{2\xi_{fire,i}^{*2}}\right\} dt \quad (3.14)$$

ここで、 $\lambda_{fire,i}^*$ と $\xi_{fire,i}^*$ は対数正規分布の変数である。区画の突破に関するより詳しい解説は 2.8 節に示してある。

3.1.2 等価火災継続時間

火災初期および減衰期の可燃物の燃焼は、火災盛期におけるそれに比べて小さいと考えられることから、区画における火災継続時間 t_{fire} は、火災盛期の継続時間、または、そのうちスプリンクラー設備の散水、在館者の消火活動、もしくは消防隊による消火活動により消火されるまでの時間に相当するものみなす。消火の影響を考慮しない火災継続時間は、区画内の収納可燃物量から想定される総発熱量 Q_C を、盛期火災時の発熱速度 $\dot{q}_B$ で除することにより、次式のように計算される。

$$t_{fire} = \frac{Q_C}{60\dot{q}_B} \quad (3.15)$$

こうして求められる実際の火災継続時間 t_{fire} を等価火災継続時間 t_{fire}^* に換算するにあたっては、実際の火災における部材への入射熱流束 $\dot{q}''$ の累計値が、標準加熱曲線による入射熱

流束 $\dot{q}_{iso}''$ の累計値に一致するよう、次式により実際の火災継続時間 t_{fire} を換算する [3.6].

$$t_{fire}^* = \left(\frac{\alpha}{460}\right)^{3/2} \cdot t_{fire} \quad (3.16)$$

ここで、 α は次のように計算される火災温度上昇係数である [3.5]. 等価火災継続時間に関するより詳しい解説は 2.8.2 項に示してある.

3.1.3 被害率

本研究では、建築物を構成する部材が、構造部材 S 、非構造部材 NS 、設備 E 、収納物 F に大別できるものとしている. 一般に、これらの部材に使用される材料の性質は異なるので、仮に、火災によって同じ強さの加熱を同じ時間だけ受けたとしても、被害の程度は異なる. また、各部材の再調達の容易性やそのための費用にも違いがあるため、被害が復旧に要する期間・費用に及ぼす影響も部材によって異なる. このため、機能維持性能の評価には、被害率 $D_{i(x)}(x = S, NS, E, F)$ を部材 x ごとに個別に評価した上で、これを区画 i の被害率 D_i に反映していく必要がある. そこで、重み付け係数 $\omega_{D(x)}(x = S, NS, E, F)$ を用いることで、次のように、式(3.5)における区画 i の被害率 D_i を求める.

$$D_i = \omega_{D(S)}D_{i(S)} + \omega_{D(NS)}D_{i(NS)} + \omega_{D(E)}D_{i(E)} + \omega_{D(F)}D_{i(F)} \quad (3.17)$$

ただし、 $\omega_{D(S)} + \omega_{D(NS)} + \omega_{D(E)} + \omega_{D(F)} = 1$ である. 機能維持性能を評価する観点からは、復旧作業に要する時間および費用を考慮して、各部材の重み付け係数 $\omega_{D(x)}$ の値を決定する必要がある.

部材 x の被害率 $D_{i(x)}$ を評価するための一般的な方法としては、あらかじめ $D_{i(x)}$ を等級化した上で (被害等級 Z)、火災による被害がいずれの等級に該当するのか、等価火災継続時間 $t_{fire,i}^*$ と、当該部材の等級 Z の性能保持時間 $t_{R(x)}(Z)$ の大小関係から、確率密度関数 $p(D_{i(x)}(Z)|t_{fire,i}^*)$ を評価することが考えられる.

$$p(D_{i(x)}(Z)|t_{fire,i}^*) = \Pr(t_{fire,i}^* > t_{R(x)}(Z)) \quad (x = S, NS, E, F) \quad (3.18)$$

なお、上式の考え方は式(3.5)と同じであり、同じ区画内にある部材であっても、部位が異なれば、火災加熱の強さは異なることが通常であるが、ここでは簡単のため、区画内部の火災加熱の強さは部位によらず一様と仮定している.

被害の等級化については、実験的な知見が十分に整備されていない材料の部材も少なくないため、現時点で合理的な根拠に基づいて定量化することは難しい. そこで、被害率 $D_{i(x)}$ は、等価火災継続時間 $t_{fire,i}^*$ が長くなるほど大きく、少なくとも性能保持時間 $t_{R(x)}$ に達する時点で 1 となることを踏まえ、次のような簡易評価式を採用する (図 3.6).

$$D_{i(x)} = \begin{cases} 0 & (0 \leq t_{fire,i}^*/t_{R(x)} < -b/a) \\ a \left(\frac{t_{fire,i}^*}{t_{R(x)}} \right) + b & (-b/a \leq t_{fire,i}^*/t_{R(x)} < 1) \\ 1 & (1 \leq t_{fire,i}^*/t_{R(x)}) \end{cases} \quad (3.19)$$

ここで、 a と b は、いずれも部材ごとに設定される定数である．式(3.19)は、等価火災継続時間 $t_{fire,i}^*$ と性能保持時間 $t_{R,i(x)}$ の間に比例関係を仮定とした最も基本的なモデルである．両者の関係が実験等によって明らかにされるようになれば、より実態に即した関数形を採用することも考えられる．なお、式(3.19)では、当該区画の中で発生した火災による汚損や焼損のみを考慮しており、他の区画で発生した火災による煙が建築物内部で拡散することによる汚損（臭い含む）や、上層階で放水・散水が行われることによる下層階の水損については考慮していない．こうした点については、機能維持性能の合理的な評価のために、今後も改良を加えていく必要がある．

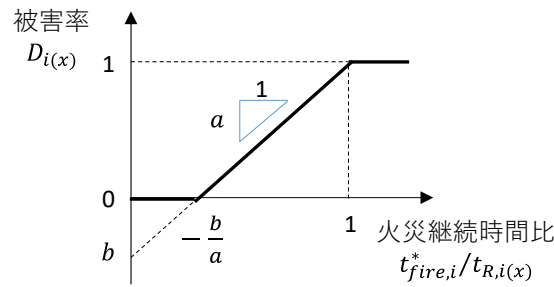


図 3.6 部材の被害率 $D_{i(x)}$ の線形モデル

3.1.4 復旧期間

復旧に要する期間 t_{rec} は、火災による被害の範囲と程度に応じた工程計画を作成した上で、各工程（調査、清掃、必要に応じて解体、設計、施工など）に要する時間を計上することで推定することができる．ただし、火災は地上階以外の階で発生し、被害が複数階に及ぶこともあるため、復旧工事の工程やその内容は、下層階からの順次の作業が基本となる新築工事のように一般化しやすいものばかりではない．そこで本研究では、帰納的な方法により復旧期間 t_{rec} を推定する方法を採用する．帰納的な方法による t_{rec} の推定には、その根拠となる事例が一定程度蓄積されている必要があるが、こうした目的のために実施された調査の例はない．そこで、直接的に火災被害からの復旧を扱うものではないものの、類似した情報が提供されている建築物リフォーム・リニューアル統計 [3.7] を利用することとし、これを火災報告 [3.3] で整理されている内容と組み合わせることで t_{rec} を推定する．

まず、建築物リフォーム・リニューアル統計 [3.7] には、いくつかの用途の建築物について、修繕工事の受注額 C と工期 t_r の関係が示されている．図 3.7 は、2016 年から 2018 年の 3

年間の記録をもとに、戸建住宅、共同住宅（専有部分、共用部分）、および非住宅の4種類の建築物（事務所、店舗、生産施設、物流・倉庫）の受注額 C と工期 t_r の関係を示したものである。この中では、店舗の t_r のみが、他に比べて工期が短いといった特徴が見られるものの、残る用途については、分布が比較的似通っている。そこで、共通の回帰式を求めると以下ようになる。

$$t_r = 0.0224C^{0.488} \text{ (日)} \quad (3.20)$$

ただし、回帰にあたっては、受注額 C が少額のデータ点を除外している。

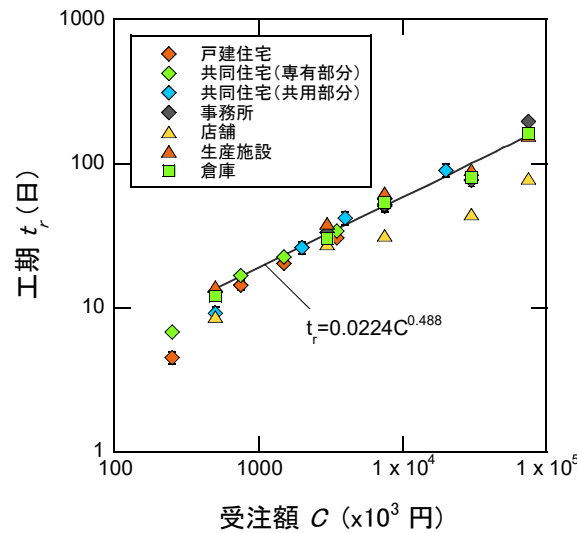


図 3.7 修繕工事における受注額と工期の関係

火災被害を受けた建築物の復旧期間 t_{rec} が式(3.20)の関係に従う場合、 C に火災による損害額を代入することで得られる t_r を、復旧期間 t_{rec} とみなすことができる。ただし、上述した被害率モデルで採用する被害は、直接的な被害の程度をそのまま表しており、貨幣尺度に換算されたものではない。そこで、火災報告 [3.3] を利用することで、直接的な被害の程度を表す焼損床面積 A_{flr}^* と損害額 C^* の関係をモデル化する。図 3.8 は、耐火建築物、準耐火建築物、木造建築物（防火造含む）の3種類の構造種別の建築物について、両者の関係を整理したものである。ただし、火災報告における定義上、損害額 C^* は火災によって受けた直接的な損害を指しており、消火のために要した経費、焼け跡整理費、休業による損失等の間接的な損害を含まない。また、火災報告では、損害額を、建築物そのものの損害額と収納物の損害額に分類しているが、式(3.20)において、受注額 C が建築物そのものの費用を指すことと整合させるため、ここでは前者のみを対象としている。図 3.8 では、焼損床面積 A_{flr}^* と損害額 C^* の間に比較的明瞭な相関関係があり、耐火建築物、準耐火建築物、木造建築物（防火造含む）

の順に、損害額 C^* の単価が高くなることが確認できる．そこで、構造種別ごとに回帰式を求めると以下ようになる．

$$C^* = \begin{cases} 57.7 \times 10^3 A_{flr}^* & (\text{耐火建築物}) \\ 32.8 \times 10^3 A_{flr}^* & (\text{準耐火建築物}) \text{ (円)} \\ 20.8 \times 10^3 A_{flr}^* & (\text{木造建築物}) \end{cases} \quad (3.21)$$

ただし、焼損床面積 A_{flr}^* は、火災となった区画の床面積 A_{flr} に被害率 D を加味することで次のように計算する．

$$A_{flr}^* = \sum_{i=1}^N D_i \cdot A_{flr,i} \quad (3.22)$$

ここで、 N は建築物内の区画数である．

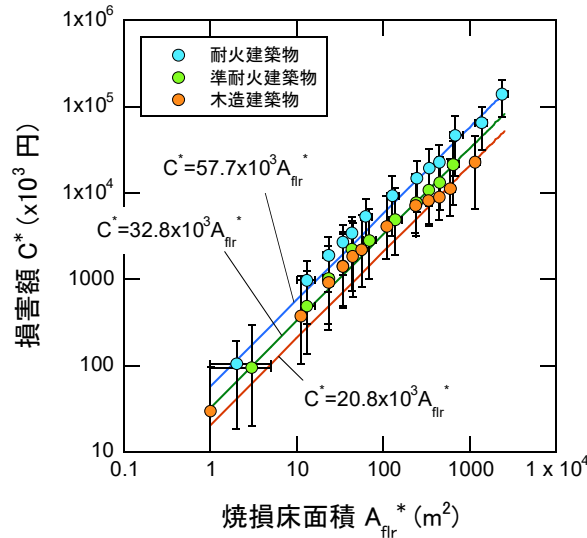


図 3.8 建物火災における焼損面積と損害額の関係（エラーバーは四分位範囲を示す）

なお、式(3.21)により求まる損害額 C^* は、火災が発生した時点における時価を示すものであるが、ここでは簡単のため、再建築費用に相当するものとみなす．ただし、建築物の資産価値は、減価償却により建築時からの期間の経過に従って低減する．このため、式(3.21)により計算される損害額 C^* は、同じ焼損床面積 A_{flr}^* の建築物を復旧させるために要する費用を過小評価している可能性がある．また、式(3.20)、(3.21)を利用して推定される復旧期間 t_{rec} は、あくまで全ての工事が完了するまでに要する時間を推定するものであり、復旧工事によって利用可能になった区画から段階的に供用を再開するような機能維持上の効果については、現時点で評価できるようになっていない．また、点には留意が必要である．

3.1.5 ケーススタディ

ここまで提示した評価手法の特徴を把握するため、事務所建築物において火災が発生した場合の機能維持性能 R の評価を行う。

(1) 計算条件

ケーススタディで対象とする建築物は、S 造、3 階建て、延床面積 3,168 m² の事務所建築物である。同建築物の基準階平面図を図 3.9 に、また、概要を表 3.1 に示す。同建築物の平面計画は片コア型であり、片側に大規模な執務室が、もう一方に階段室や廊下、トイレ、小規模な打ち合わせ室などが設けられている。平面図には、火災時において、内部の延焼拡大

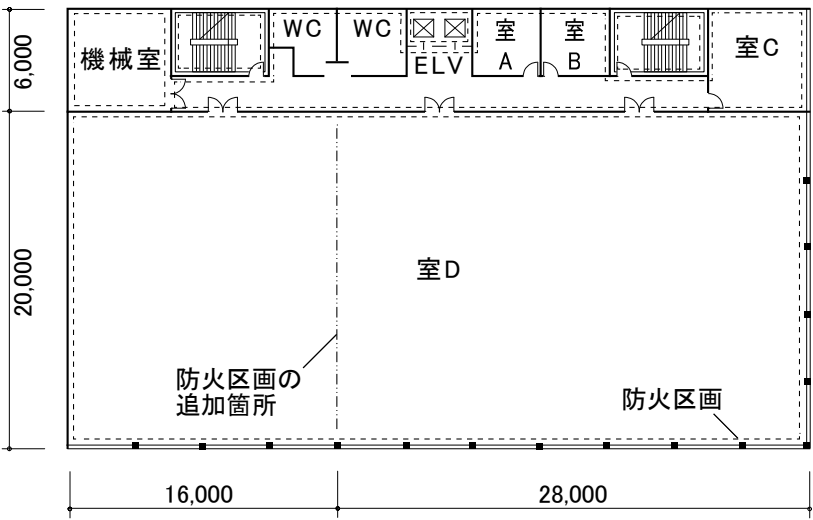


図 3.9 事務所建築物の基準階平面図

表 3.1 対象とする事務所建築物の概要

用途		事務所
構造種別		S 造
階数		3
建築面積		3,168 m ²
階高		2.8 m
区画数		12
収納可燃物 [3.5]	事務室	560 MJ/m ²
	その他の室	32 MJ/m ²

表 3.2 感度分析の条件

識別子	項目		基準条件	改良条件
RS	耐火時間 t_R	主要構造部	60 分	90 分
		外壁開口部	20 分	
SP	スプリンクラー設備の設置の有無		なし	あり
C	区画 D の分割数		1	2

を防止することが期待される区画の範囲が点線で示されており、各階は 6 つの区画に分けられている。ただし、2 か所の階段室および 1 か所のエレベーターシャフトは、それぞれが 1 つの堅穴として区画化されているため、対象建築物内の区画の総数は 12 である。

ここでは、表 3.2 に示す 3 項目（主要構造部の耐火時間 t_R (RS)、スプリンクラー設備の設置 (SP)、室 D の区画化 (C)) に着目し、これらを組み合わせた条件に応じて、どのように機能維持性能 R が変化するか、感度分析を行った。このうち、主要構造部（柱、壁、床など）の耐火時間 t_R については、通常の耐火建築物に対して、全ての主要構造部に要求される 60 分を基準とし、これが 90 分に改善され、火災区画から隣接する火災区画への延焼が抑制される条件を調べた。スプリンクラー設備については、全く設置されていない条件を基準として、全ての室に設置され、火災の拡大が未然に防止される条件を調べた。また、区画については、建築物全体で 12 の区画に分割される条件を基準として、床面積が最も広い室 D が 2 つの区画に分割される条件を調べた（図 3.9 参照）。

(2) 計算結果

表 3.2 に示した 3 項目（主要構造部の性能向上（耐火時間 t_R の延長）、スプリンクラー設備の設置、室 D の区画化）を組み合わせた、計 8 条件の計算結果（焼損床面積 A_{flr}^* 、復旧期間 t_{rec} 、機能維持性能 R ）を表 3.3 および図 3.10 に示す。基本となる条件 O は、主要構造

表 3.3 機能維持性能の評価結果

条件	主要構造部の耐火時間 (分)	スプリンクラー設備の設置	区画 D の分割数	焼損面積 A_{flr}^* (m ²)	復旧期間 t_{rec} (日)	機能維持性能 R
O	60	なし	1	352.7	82.6	0.774
RS	90	なし	1	199.5	62.5	0.829
C	60	なし	2	253.7	70.3	0.807
SP	60	あり	1	123.1	49.4	0.865
RS+C	90	なし	2	123.6	49.5	0.864
RS+SP	90	あり	1	72.6	38.2	0.895
C+SP	60	あり	2	78.7	39.7	0.891
RS+C+SP	90	あり	2	44.1	29.9	0.918

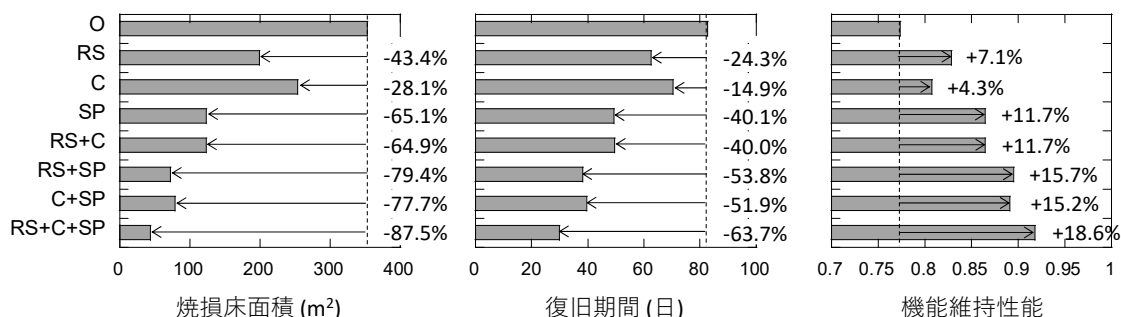


図 3.10 焼損床面積，復旧期間，機能維持性能に関する計算結果

部の耐火時間 t_R が 60 分，スプリンクラー設備なし，室 D の区画化なしの条件である．この時，焼損床面積 A_{flr}^* は 352.7m²，復旧期間 t_{rec} は 82.6 日，機能維持性能 R は 0.774 となった．ただし，検討にあたっては，機能維持性能 R を求める際に必要となる分析期間 $t_L - t_0$ を出火後 1 年間で固定した．また，建築物の規模がそれほど大きくないことを考慮し，いずれかの室で復旧作業が行われている場合には，建築物全体が使用不能な状態にあるものとした．

これに対し，3 項目のいずれかを改善した条件 RS，C，SP では，焼損床面積 A_{flr}^* が 123.1～253.7m²と，条件 O に比した低減率は 28.1～65.1%となった．ただし，復旧期間 t_{rec} は 49.4～70.3 日と，条件 O に対する低減率は 14.9～40.1%に，機能維持性能 R も，0.807～0.865 と，条件 O に比した増加率は 4.3～11.7%に留まった．焼損床面積 A_{flr}^* の低減率の大きさに比べて，復旧期間 t_{rec} の低減率が小さかった理由は，式(3.20)において，工期 t_r （すなわち復旧期間 t_{rec} ）が受注額 C （すなわち式(3.21)の損害額 C^* ）が代入されることで焼損床面積 A_{flr}^* に比例)の 0.488 乗に比例することとなり，焼損床面積 A_{flr}^* に対する感度が小さいためである．なお，今回検討した 3 項目の中では，スプリンクラー設備の設置，主要構造部の耐火時間 t_R の延長，室 D の区画化の順に，機能維持性能 R を改善する効果があるとの結果が得られた．

複数の項目を改善した条件 RS+C，RS+SP，C+SP，RS+C+SP では，1 つの項目を改善した条件以上の機能維持性能 R の改善効果が確認できた．機能維持性能 R が最も改善した条件は RS+C+SP であり，焼損床面積 A_{flr}^* は 44.1m²（低減率 87.5%），復旧期間 t_{rec} は 29.9 日（低減率 63.7%），機能維持性能 R は 0.918（増加率 18.6%）となった．

図 3.11 は，機能維持性能 R に加え，従来型の建築物の防火性能の尺度の一つである延焼防止性能 [3.8] について，基本条件 O に対する各条件の性能改善率を計算した結果を示している．これによると，機能維持性能 R では，表 3.2 に示した 3 項目のうち，スプリンクラー設備の設置が性能改善に最も効果的な項目であったのに対し，延焼防止性能では，室 D の区画化が最も効果的な項目となり，両者の間に違いが生じる結果が得られた．機能維持性能 R は，焼損床面積 A_{flr}^* を低減することが性能の向上につながるため，火災の初期段階で効果を発揮するスプリンクラー設備の設置が有効であったと考えられる．これに対し，延焼防止性能は，建築物内部の火災が周辺への火源となることを回避することが性能の向上につな

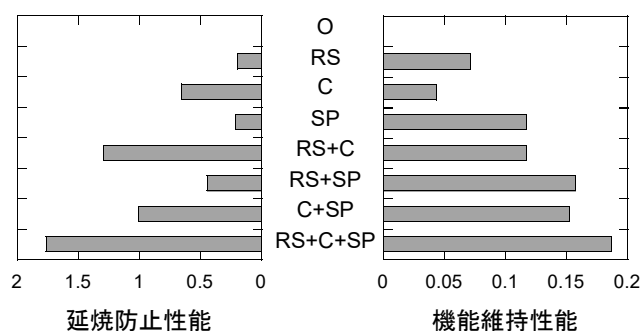


図 3.11 機能維持性能の改善率の比較

がるため、火災の大規模化を防止する区画の設置が有効であったと考えられる。こうした結果は、機能維持性能 R が、従来の尺度とは異なる観点から建築物の防火性能の評価を行えていることを示すものではあるが、本ケーススタディで対象とした建築物の条件にも依存するため、より一般的な結論を得るには、さらなる検討が必要である。

3.2 火災被害を受けた建築物の復旧事例の分析

建築物あるいは地域が提供する機能が、災害による低減を経ても、なお保持されている割合（機能維持性能）はレジリエンスとも呼ばれ、これまでに多くの定量的な評価手法が提案されてきた。しかし、こうした評価手法が対象としてきた災害は、地震などの自然災害が多く、火災などの人為的な災害に対する検討はほとんどなされてこなかった。その理由の一つとして、復旧事例に関する情報がまとまった形で収集・蓄積されにくかった点が挙げられる。自然災害の場合には、その影響が同時かつ広範囲に及ぶため、相当数の被災建築物が一度に発生する場合が多い。このため、被災した地域の事業所などに対して集団調査を行えば、一定数の回答を得ることができ、そこから復旧の経過を明らかにすることができた〔例えば 3.9〕。これに対し、火災は散発的に発生する上、目立った被害が生じた事例を除けば、発生そのものが認識されず、所在が特定されることもないため、被災者に対して直接回答を求める集団調査の対象にはなりにくかった。

そこで本研究では、新聞等の一般に公開されている報道資料などから、火災に関する被害とその後の復旧過程に関する情報の収集を行った。また、ここに火災統計から得られる情報を組み合わせることで、火災被害を受けた建築物の復旧期間を推定するため確率的なモデルを構築することとした。

3.2.1 復旧事例の収集

(1) 事例収集の方法

事例収集には、日本経済新聞社の記事データベース（日本経済新聞、日経産業新聞、日経MJ、日経地方版）を利用することとし、2000年から2019年までの20年間に紙面に掲載された建物火災に関する記事のうち、復旧に関連する内容が記載されているものを抽出した。ただし、抽出された記事には、記載されている項目が限定され、それだけでは復旧の経過を特定することが困難な場合もあった。このため、例えば、火災被害を受けた建築物（以下、被災建築物）が上場企業によって所有されている場合には、決算資料から関連する情報を抽出して結びつけた。また、被災建築物が公共建築物の場合には、復旧計画に関する報告書や議会記録などの情報も参照した。その他、被災建築物の所有者や関係者によるWeb上での発信があれば、該当する情報を補完するために利用した。

報道資料から収集した主な項目は以下の通りである。

- 火災発生日月日

- 所在市区町村
- 建築物の条件（用途，構造種別，階数，延床面積など）
- 火災による被害（焼損床面積，死傷者数など）
- 復旧の方法（改修，建て替え（被災建築物，被災建築物と同一敷地の別建築物，被災建築物とは別敷地の建築物），解体，移転，不明）
- 復旧（一部／完全）の時期

このうち，復旧の方法については，「改修」や「建て替え」が最も一般的であった．ただし，建て替え事例の中には，被災建築物を解体した後に同じ場所で建て替えをする事例の他に，被災建築物と同一敷地内の空きスペースに別の建築物として建て替える事例，被災建築物とは別敷地に建て替える事例（「移転」と呼ぶ）が見られた．この他，特に被害程度が大きい場合には，事業の再開を断念して「解体」した事例や，被災した建築物とは別の既存建築物を利用して業務を再開する事例（同じく「移転」）も見られた．

また，復旧に至るまでの過程については，まずは火災による影響を受けなかった部分を利用して業務を再開し，影響を受けた部分の復旧作業が完了した後に，全面的な復旧に至る事例が多く見られた．一方で，全面的に建築物の利用を停止し，復旧工事が完了した後に復旧に至る事例も見られた．そこで，被災建築物の改修あるいは建て替えが完了する前であっても，焼損した部分が担っていた機能が別の場所で代替されることで，一部の機能復旧を果たすために要した期間のことを，ここでは「部分復旧期間」と呼ぶ．また，改修や建て替えといった工事の完了を経て，被災建築物がもともと担ってきた全ての機能を回復するまでに要した期間を「完全復旧期間」と呼ぶ．

(2) 復旧事例の概要

報道資料等から復旧に関する情報を収集できた被災建築物の数は 193 件であった．その内訳を整理したものが図 3.12 である．

まず，(a)の用途については，記事データベースを情報源としているために，不特定多数が利用する商業施設や，比較的規模が大きな工場，倉庫に関する事例が多い．これに対し，利用者が限定される住宅系用途や事務所用途の建築物に関する情報は含まれていない．

(b)の延床面積 A_{floor} については， 1000 m^2 以下の比較的規模の小さい建築物の比率が高い．ただし， 10000 m^2 を超えるような規模が大きな建築物に関する情報も一定数が確保されている．

(c)は，延床面積 A_{floor} に対する焼損床面積 A_B の比率である焼損面積比率 r_B を表している．こちらも A_{floor} の場合と同様，幅広い r_B の事例から構成されることが確認できる．なお，全体のうち 59 件では r_B を特定することができていない．

(d)の復旧の方法については，全体の半分近くの事例で復旧方法を特定することができなかった．移転による復旧は，火災被害を受けた建築物の所有者が，もともとその建築物が保持していた機能を早期に回復させるために採りうる有力な手段である．ただし，本研究では，

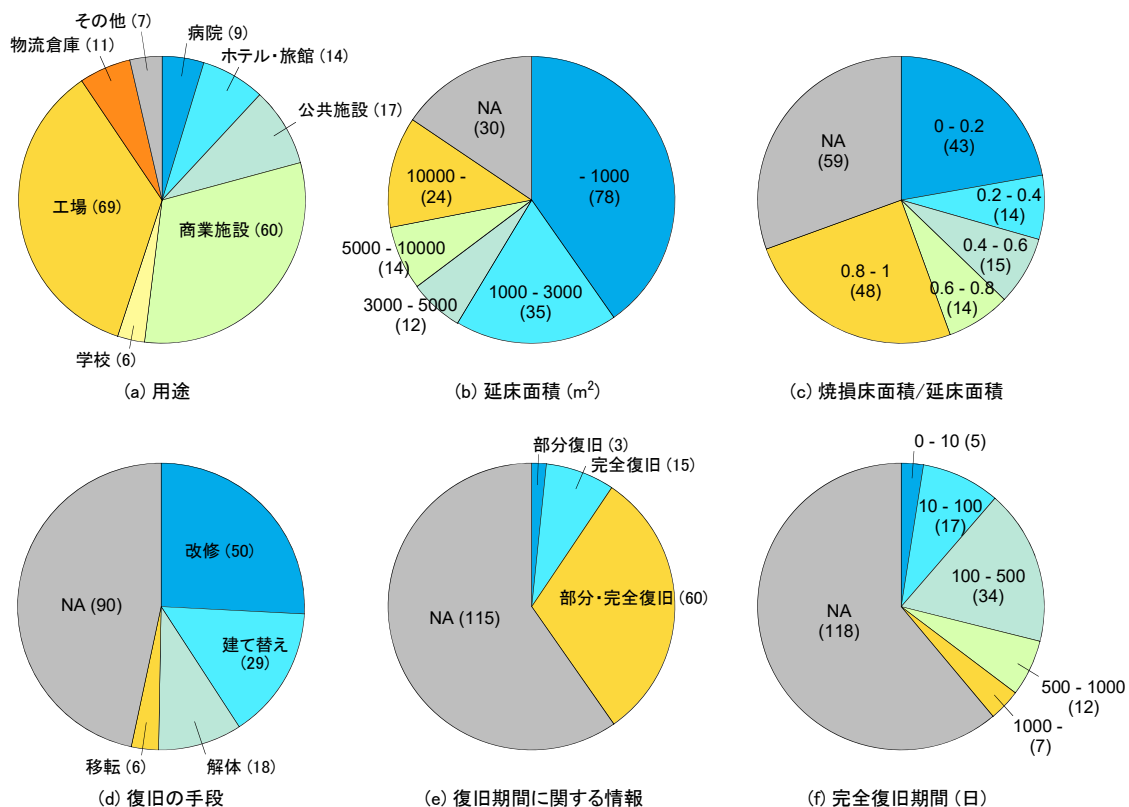


図 3.12 収集された火災復旧事例（全 193 件）

仮にある建築物が火災被害を受けた場合であっても、その建築物の機能が停止しないこと、あるいは、停止したとしても早期に回復できることを、その建築物が保持している性能と捉え、評価することを目的とする。このため、これ以降は、移転による復旧は分析の対象から除外し、専ら、被災建築物自体の改修や建て替えによる復旧に着目する。

(e)の復旧期間については、正確な期間を特定できる事例が少なかった。収集された事例のうち、部分復旧期間、完全復旧期間のいずれかを特定できたものは 78 件であった。このうち 60 件では、部分復旧の後に完全復旧に至るという段階的な復旧過程を経ていた。

最後に(f)は、75 件の事例の完全復旧期間の内訳を示したものである。完全復旧に至るまでに長い期間を要する場合も少なくなく、完全復旧期間を特定できた事例の 2 割強が 500 日を超える期間を要していた。復旧期間には、改修または建て替えのための設計・施工に要する期間だけでなく、復旧方法の検討や復旧資金の調達などに要する期間が含まれているが、特に後者については事例ごとのばらつきが大きいものと推察される。

図 3.13 は、火災被害を受けた建築物の復旧過程の特徴を把握するために、火災被害の程度を代表していると考えられる焼損床面積 A_B で、部分復旧期間および完全復旧期間を整理した結果である。両復旧期間と焼損床面積 A_B の間に一定の相関があることも予想されたが、得られた分布には明瞭な相関が見いだせず、ばらつきが大きかった。特に、部分復旧期間については、この分布から一貫した傾向を見出すことはできない。これは、焼損床面積 A_B が大

きい場合であっても、被災建築物の内部に機能を一時的に移し、業務を再開することが可能な場合があるためと考えられる。これに対し、完全復旧期間については、焼損床面積 A_B との関係が比較的にせよ確認できる。ただし、改修による復旧と建て替えによる復旧とでは、その傾向に違いが見られる。改修による復旧の場合には、焼損床面積 A_B が大きくなるほど、完全復旧期間も緩やかに長くなる傾向がある。一方、建て替えによる復旧の場合には、焼損床面積 A_B の大きさによって完全復旧期間が大きく変わることはなく、むしろ A_B が大きいほど完全復旧期間が短くなる傾向がある。これは、規模が大きな建築物の構法には、一般に工期が短いとされる S 造が採用される場合が多いこと [3.10]、また、建て替え工事には被災建築物の解体が前提となるため、焼損床面積 A_B の違いが完全復旧期間に与える影響が相対的に小さくなることなどが理由として考えられる。

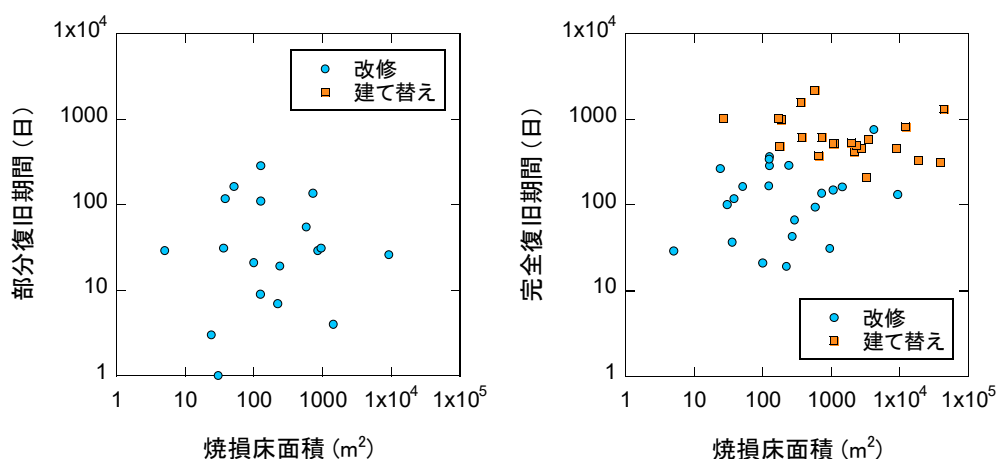


図 3.13 焼損床面積と部分復旧期間および完全復旧期間の関係

3.2.2 機能の復旧過程

収集した事例を利用することで、火災被害を受けた建築物が、部分あるいは完全に機能復旧を果たすまでに要する期間を分析する。分析にあたっては、復旧過程にシナリオを当てはめた上で、シナリオごとに、被災した建築物の機能状態の段階的回復に要する時間をモデル化することとした。

(1) 復旧シナリオ

収録された復旧事例の分析結果に基づき、本研究では、復旧過程における建築物の空間・機能上の状態を、表 3.4 に示す F_0 , F_1 , F_2 , F_3 の 4 つの状態に分類する。このうち、状態 F_0 は、全面的に内部への進入ができない状態、状態 F_3 は、改修・建て替えが終わり、建築物の空間・機能を利用する上での制約がなくなった状態を指している。状態 F_1 , F_2 は、復旧の

途上にある状態を指している。このうち、状態 F_1 は、被災部分への進入ができず、その部分が担っていた機能が停止している場合、状態 F_2 は、被災部の機能が、同じ建築物内部の他の部分で代替された場合を指している。実際の復旧過程は、表 3.4 に示す 4 状態よりもさらに細かい分類が可能である場合もあるものと考えられるが、報道資料等から入手可能な情報の制約上、これ以上の分類は困難であった。

表 3.4 火災被害を受けた建築物の空間・機能分類

状態	空間	機能
F_0	全面進入不可	全面停止
F_1	被災部分への進入不可	被災部分の機能停止
F_2 (部分復旧)		被災部分の機能を他で代替
F_3 (完全復旧)	制約なし	制約なし

被災建築物の復旧の過程は、解体後に再建されない場合、および、移転による復旧される場合を除けば、部分的に改修される場合と解体後に再建される場合の 2 通りに大別される。図 3.14 は、改修する場合をシナリオ I、建て替える場合をシナリオ II として、火災後の機能率の復旧過程を模式的に描いたものである。図 3.14 に示す機能状態 F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 は、表 3.4 に示す空間・機能分類に対応付けられている。シナリオ I では、火災により状態 F_1 となった後、改修により状態 F_2 から状態 F_3 へと段階的に移行する。シナリオ II では、火災により状態 F_0 となった後、状態 F_1 、 F_2 を経ることなく状態 F_3 に移行する。

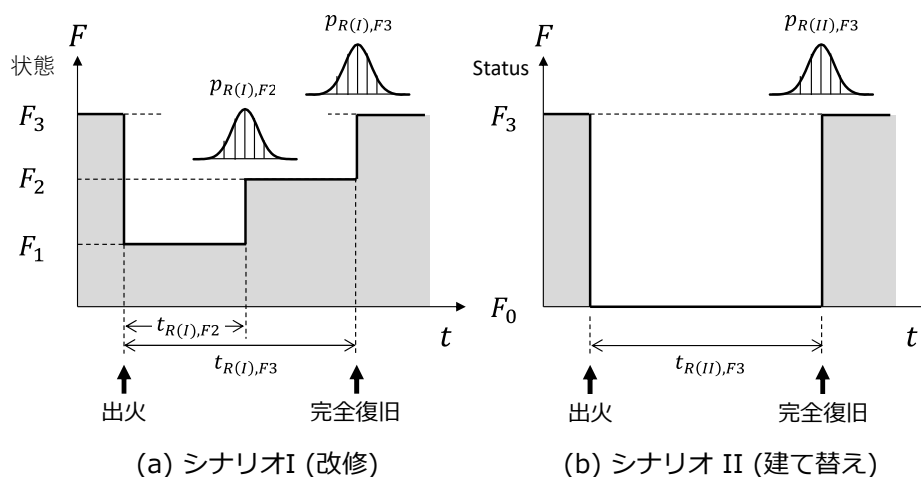


図 3.14 被災建築物の段階的復旧過程

上記の 2 つのシナリオのうち、いずれが選択されるのかは、被災した建築物の用途や規模

といった条件に加え、焼損床面積や損害額といった被害の程度に関する条件などに左右される。復旧事例において、こうした条件を特定することができた事例は 82 件あった。ただし、解体後に再建されない事例は、被害程度が大きく、改修が困難と判断されたものとみなして、非改修事例である建て替え事例に含めることとした。図 3.15 は、焼損床面積 A_B を延床面積 A_{floor} で除した焼損床面積比率 r_B と、建て替え比率 p_{II} の関係を整理した結果である。焼損床面積比率 r_B が小さい場合であっても、建て替えを選択することはあるものの、基本的には、 r_B が大きくなるに従って建て替え比率 p_{II} が大きくなる傾向を確認できる。変化率は r_B が 0.3 から 0.4 にかけてが大きく、 r_B が 0.5 以上となると、全ての事例で建て替えが選択されている。こうした分布の特徴を考慮して、焼損床面積比率 r_B を変数とするロジスティック曲線により建て替え比率 p_{II} を回帰すると次式が得られる。

$$p_{II} = \frac{\exp(\eta)}{1+\exp(\eta)} \quad (3.23)$$

$$\eta = -3.40 + 11.0r_B \quad (3.24)$$

得られた回帰式は、図 3.15 に曲線として書き込んである。なお、改修比率は $p_I = 1 - p_{II}$ として求めることができる。

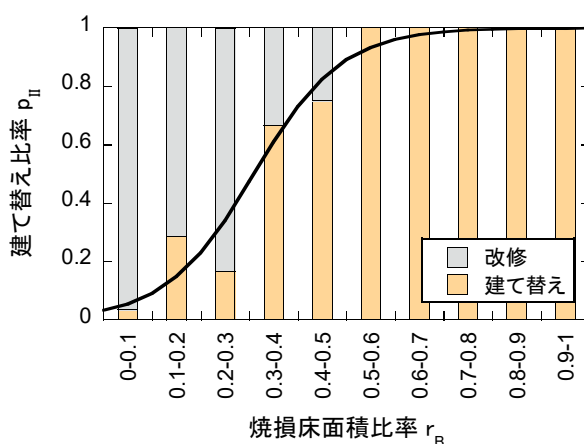


図 3.15 焼損床面積比率と建て替え比率

(2) 復旧期間

火災被害を受けた建築物の復旧には、「火災被害の調査」、「清掃・(一部)解体」、「資金確保」、「設計・施工会社との契約」、「基本・実施設計」、「建築確認申請」、「施工」など、多岐にわたる工程を経る必要がある。ただし、各工程に要する期間は、所有者の個別の事情や、その時々社会状況などに左右されるため、大きな不確実性を伴う。そうした中でも、復旧過程の最終段階に位置付けられる「施工」に要する期間は、比較的変動が小さい上、復旧期

間 t_R の中の小さくない部分を占める場合が多いことが想定される．例えば，収集した火災復旧事例のうち学校が被災したものの中には，復旧期間 t_R の4.7カ月に対し「施工」期間が4カ月（比率0.85）の事例があった一方で，復旧期間 t_R の27カ月に対し「施工」期間が16カ月（比率0.59）の事例もあった．そこで，「施工」期間 $t_{R,ref}$ を基準期間とみなし，各復旧期間 t_R （シナリオⅠの下での機能 F_2 の復旧期間 $t_{R(I),F2}$ ，同じく機能 F_3 の復旧期間 $t_{R(I),F3}$ ，シナリオⅡの下での機能 F_3 の復旧期間 $t_{R(II),F3}$ ）を $t_{R,ref}$ で除すことで求めた正規化時間 t_R^* により，復旧率 p_R の整理を試みる．

シナリオⅠの改修とシナリオⅡの建て替えにでは，工事内容が異なることから，各シナリオの「施工」期間 $t_{R,ref}$ も異なると考えるべきである．そこで，シナリオⅠについては，建築物の改修工事の実態を調べる建築物リフォーム・リニューアル統計に基づいて，式(3.20)として示した改修工事の受注額 C と工期 $t_{R,ref(I)}$ の関係を利用する．

$$t_{R,ref(I)} = 0.0224C^{0.488} \text{ (日)} \quad (3.20, \text{再掲})$$

ただし，記事データベースから抽出された個別の事例について，改修工事の受注額 C を特定することは難しいことから，式(3.21)として示した焼損床面積 A_{flr}^* と損害額 C^* の関係を利用する．

$$C^* = \begin{cases} 57.7 \times 10^3 A_{flr}^* & \text{(耐火建築物)} \\ 32.8 \times 10^3 A_{flr}^* & \text{(準耐火建築物)} \\ 20.8 \times 10^3 A_{flr}^* & \text{(木造建築物)} \end{cases} \text{ (円)} \quad (3.21, \text{再掲})$$

式(3.21)により求まる損害額 C^* は，火災が発生した時点における時価であるが，ここではこれが復旧工事費用に相当するものとし，式(3.20)の受注額 C に代入して得られる改修工事の工期 $t_{R,ref(I)}$ とみなす．

シナリオⅡについては，日本国内における建築物の着工状況を調べる統計である建築着

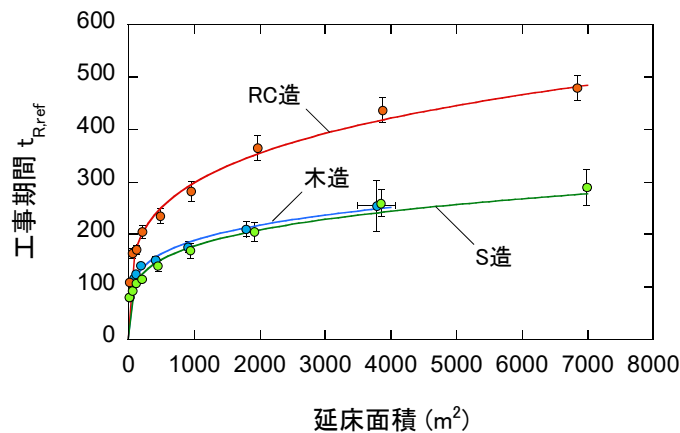


図 3.16 延床面積と工事期間の関係

工統計調査報告 [3.10] を利用して「施工」期間 $t_{R,ref}$ を推定する．図 3.16 は，2012 年から 2020 年までの 9 年間の延床面積および構造種別の別に応じた工事期間を示したものである．これによると，延床面積と工事期間の間に明瞭な関係性を見出すことができる．構造種別ごとに回帰式を求めると次のようになる．

$$t_{R,ref(II)} = \begin{cases} 53.0A_{flr}^{0.250} & (\text{RC 造}) \\ 36.5A_{flr}^{0.229} & (\text{S 造}) (\text{日}) \\ 44.4A_{flr}^{0.209} & (\text{木造}) \end{cases} \quad (3.25)$$

正規化復旧期間 t_R^* は，復旧期間 t_R を，上記のように求められる「施工」期間（改修によるシナリオ I では $t_{R,ref(I)}$ ，建て替えによるシナリオ II では $t_{R,ref(II)}$ ）で除すことにより求まる．図 3.17 は，焼損床面積 A_B と正規化部分復旧期間および正規化完全復旧期間を比較した結果を示している．図 3.13 の正規化される前の復旧期間との関係と比較すれば，依然として大きなばらつきが残されているが，データ間の相関が高まったように見える．なお，正規化部分復旧期間および正規化完全復旧期間の双方において， A_B が大きくなるほど正規化復旧期間 t_R^* は短くなっている．これは，建築物の規模が大きくなるほど，全復旧期間における施工期間の割合が大きくなることを意味している．

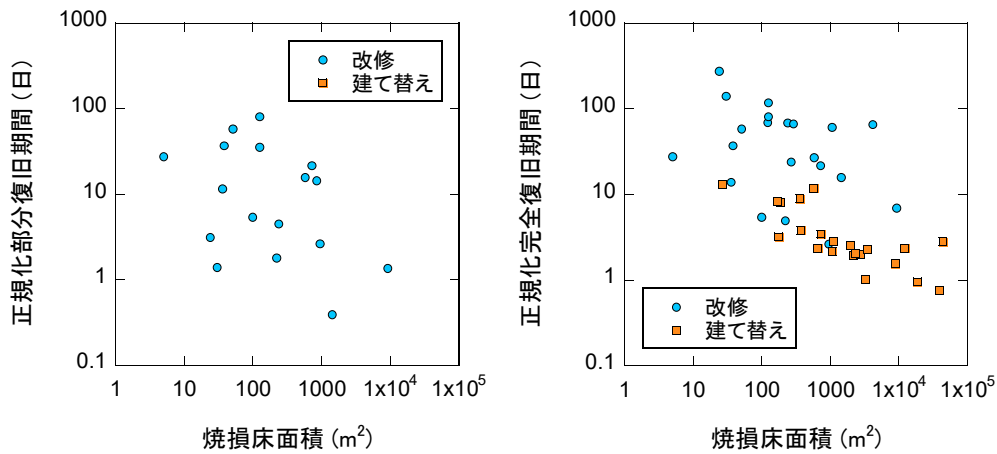


図 3.17 焼損床面積と正規化部分復旧期間および正規化完全復旧期間の関係

地震の揺れによって損傷した建築物の復旧期間については，標準正規分布関数を用いて超過確率がモデル化された例がある [3.11]．ここではこうした考え方にならない，正規化復旧時間 t_R^* と，超過復旧確率 p_R の関係を次のようにモデル化する．

$$p_R = \Phi\left(\frac{\ln(t_R^*) - \lambda}{\xi}\right) \quad (3.26)$$

ここで， Φ は標準正規分布関数， λ と ξ はそれぞれ $\ln(t_R^*)$ の平均と標準偏差である．記事デー

データベースから抽出された事例データを回帰した結果を図 3.18、および表 3.5 に示す。回帰に利用できた事例の数 N は、シナリオ I における部分復旧期間（レベル F_2 回復） $t_{R(I),F_2}$ が 30 件、同完全復旧期間（レベル F_3 回復） $t_{R(I),F_3}$ が 35 件、シナリオ II における完全復旧期間（レベル F_3 回復） $t_{R(II),F_3}$ が 22 件であった。いずれの復旧過程についても、概ね良好な結果が得られた。復旧期間 $t_{R(I),F_2}$ 、 $t_{R(I),F_3}$ 、 $t_{R(II),F_3}$ の期待値 μ は、各基準時間 $t_{R,ref}$ の0.282倍、1.12倍、3.38倍となり、この順で復旧に要する時間が短かった。

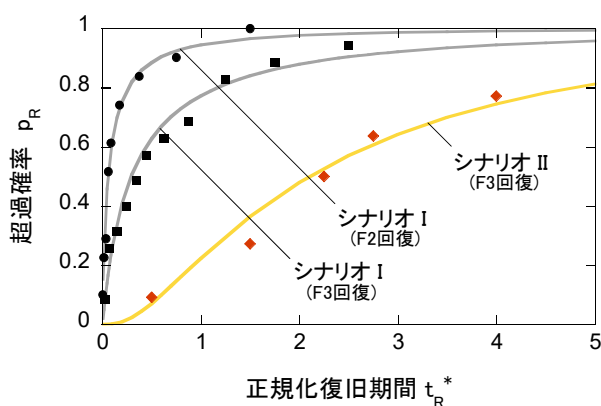


図 3.18 正規化復旧時間と超過復旧確率

表 3.5 復旧率曲線の回帰結果

シナリオ	状態	N	μ	σ	λ	ξ
I	F2 回復	30	0.282	1.28	-2.81	1.75
	F3 回復	35	1.12	4.13	-1.23	1.64
II	F3 回復	22	3.38	4.26	0.743	0.975

3.3 漏煙が機能維持性に及ぼす影響：システム天井の裏側への漏煙量計測

建築基準法では、主に人命の安全確保を目的として、建築物に構造耐火および防火区画（延焼防止）の性能を要求している。これらの性能を定量化するため、耐火試験において標準加熱曲線下の加熱を行い、非損傷性、遮熱性、および、遮炎性を確認している。必要最低限の基準としてはこれらが重要となる一方で、経済活動を考えた場合、人的資源以外にも金銭的資源や無形資源、あるいは建築物以外にも機械や設備等の有形資源も無視できない。特に情報技術化が進んだ現代では、たとえ火災が小火で済み、建築物的な被害が局所的に抑えられたとしても、パソコンやインターネットなどの OA 環境が寸断されると、製造・サービスの提供が滞り、経済活動や社会活動に大きな影響を与える。そこで、火災そのものや火炎からの直接の輻射熱のように高温となる火災加熱の広がり比べ、低温ではあるが火災初期にも比較的広範囲に広がる煙による被害を予測すべく、システム天井裏側への煙漏気量を計測した。

国内では、高温時の遮煙性能は EV 扉に要求されている程度である。それもロビーを防火区画すれば鉄板の厚みを規定した仕様規定に準じることで不要となるため、これまで試験の需要は少なかった。これに対し、ヨーロッパでは、病院で籠城するための区画として、耐火性のある区画に加えて、遮煙性能(中温:200℃)のある区画を二重に要求している[3.12]。1つの壁に両性能を持たせられない理由は、高温時の遮煙は達成が困難なためである。これを踏まえて、本研究では、火災初期の温度および圧力の上昇によって、天井裏にどれくらいの煙が漏れるかに焦点を当てて検討を行う。

3.3.1 天井埋め込み器材からの漏気量実験

耐火試験で確認する延焼防止性能は、上階の居室に対してであり、下階の天井と上階の床をまとめて区画構成部材とみなしており、床単体で十分な耐火性能を有する RC 造床などの場合は、天井は付属物の扱いであり耐火性能を期待しない。よって、天井裏に配管・配線された材料への煙汚染に着目した場合、システム天井に埋め込まれる換気口や照明器具周囲には、適当な区画貫通部処理が施されない場合も多く、火災初期における天井裏への煙の汚染は充分に考えられる。

そこで初めに小規模模型を用いた燃焼実験を行い、火災初期の局所火源に対し、天井下と天井裏でどれくらいの圧力差が生じるのかを確認した。図 3.19 に示すように、幅 450mm×奥行 900mm 高さ 600mm の模型区画を製作し、床面中央に 10~30kW で調整が可能なバーナー火源を設置した。区画内部には床面から 50mm 上部を起点に高さ 100mm 間隔で熱電対を設置し、温度分布を測定した。また天井には幅 50mm×50mm, 20mm×12.5mm, 10mm×250mm のスリットを設け、天井裏 50mm の位置にも熱電対を設置した。同スリットの内外で微差圧計により圧力を計測した。図 3.19 に示すように、計測された圧力差、及び温度分布から計算される圧力差は良い一致を示し、天井内外での圧力差は最大 6Pa 程度生じるこ

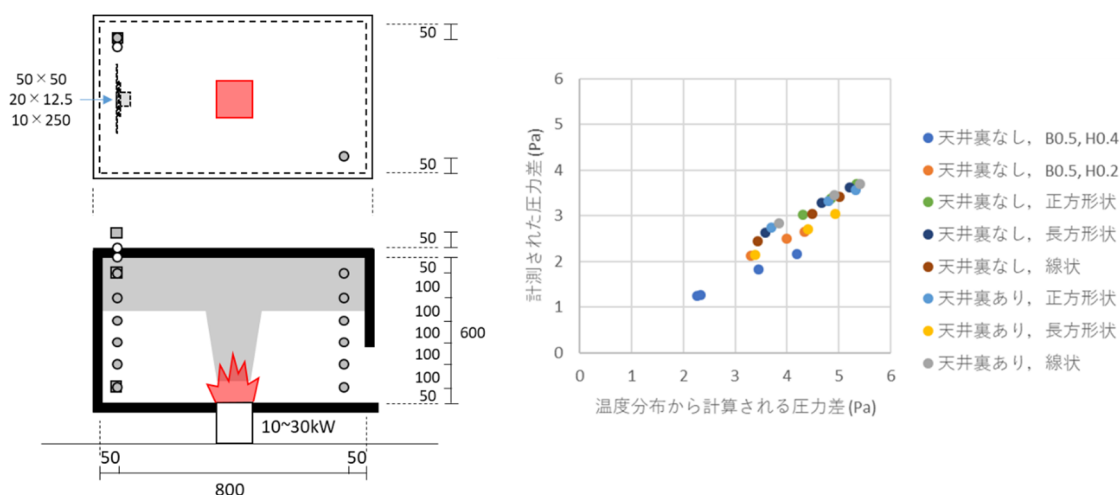


図 3.19 小規模区画模型を利用した火災時の内外差圧に関する計測結果

とが分かった。

次に、図 3.20 に示すように、先の実験で得られた圧力差を生じさせた環境で、天井に設置された各機器を通じて、非加熱時の漏気量を測定した。床面約 1m×1m、天井高さ約 2m の模型区画の下部にブロアーとダンパーを設置し、上部にチャンバーと定置式複合ピトー管センサー（エアメジャー）を設置することで、この環境を再現可能な実験装置を作成した。そして図 3.20 の緑枠部に各種器具を埋め込んだ天井試験体を挟み込む形で、当該圧力差条件下での天井裏への漏気量を測定した。

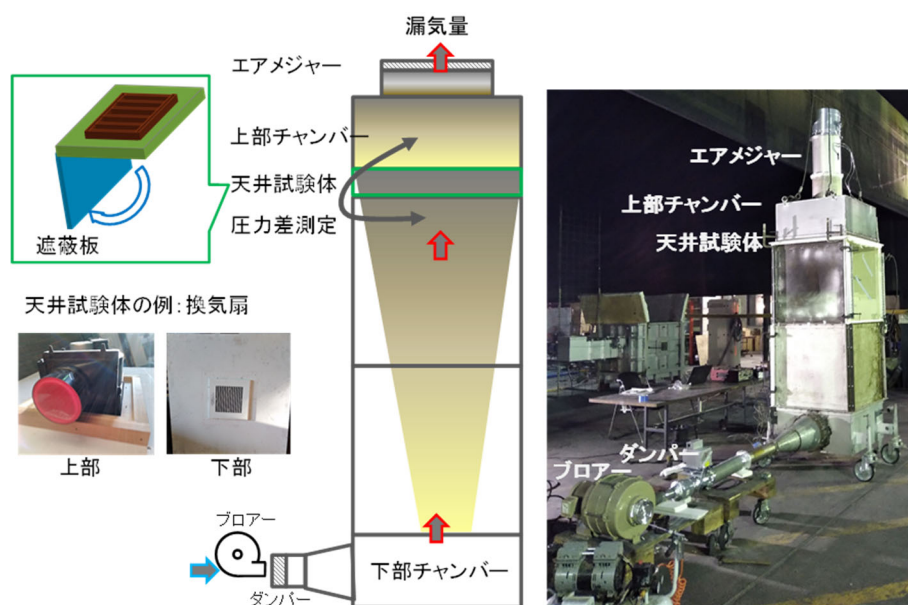


図 3.20 天井埋め込み器材からの漏気量実験の状況

天井埋込器具は、表 3.6 に示す LED 照明・換気扇・引掛ローゼット・スピーカー・コンセント・非常用照明の 6 体とし、製品に付与されている施工要領書に基づいて天井板（ケイ酸カルシウム板 12mm）に施工した。

表 3.6 天井埋め込み器具一覧

器具名	メーカー	品番
LED 照明	東芝ライテック	LEDG87034L-LS
換気扇	パナソニック	FY24
引掛ローゼット	パナソニック	WG6420WK
スピーカー	オースミ電気	OE-233MAT
コンセント	パナソニック	WNP1302MWP
非常用照明	パナソニック	NNFB90005J

(1) 実験方法

天井試験体下部に遮蔽版を設置した状態で、下部のブロアーを稼働させ、天井試験体を挟んだ上下での圧力差が約 6Pa および圧力差が漏気量に与える感度を調べるため約 3 割増と

した 8Pa となるように、ダンパー開度を調整した。その後、遮蔽板を開放し、圧力が約 6Pa で安定した状態（約 30 秒後）で次の 8Pa に風量を上げ、それぞれの条件下で、天井下と天井裏での圧力（大気圧標準）と天井裏での漏気量を測定した。

(2) 実験結果

実験結果一覧を表 3.7 に、また、そのうちの換気扇とスピーカーの漏気量の測定結果を図 3.21 に示す。スピーカーのみ天井裏での圧力上昇および漏気量の増加が見られた。換気扇は見えがかり上、ルーバー状に隙間が見えてはいるが、天井裏では排気管につながっている。本実験では実建築物を想定して、排気管端部に蓋をして実験を行っているため、天井裏への漏気は見られなかった。一方で、スピーカーは天井面への振動の伝わりを防ぐために、天井板と縁を切って施工する方法がとられており、その部分はシーリング材等での穴埋めもなされないため、火災時の圧力上昇条件下では、ある程度の気流の流れが生じると考えられる。

表 3.7 実験結果一覧

器具名	実験条件	天井下圧力	天井裏圧力	漏気量
LED 照明	6Pa	5.89Pa	-0.16Pa	0
	8Pa	8.34Pa	-0.16Pa	0
換気扇	6Pa	5.26Pa	-0.15Pa	0
	8Pa	7.73Pa	-0.15Pa	0
引掛ローゼット	6Pa	5.88Pa	-0.15Pa	0
	8Pa	8.34Pa	-0.16Pa	0
スピーカー	6Pa	2.59Pa	0.46Pa	9.98 m ³ /h
	8Pa	4.09Pa	0.78Pa	10.10 m ³ /h
コンセント	6Pa	5.89Pa	-0.45Pa	0
	8Pa	8.35Pa	-0.45Pa	0
非常用照明	6Pa	5.58Pa	-0.42Pa	0
	8Pa	7.73Pa	-0.42Pa	0

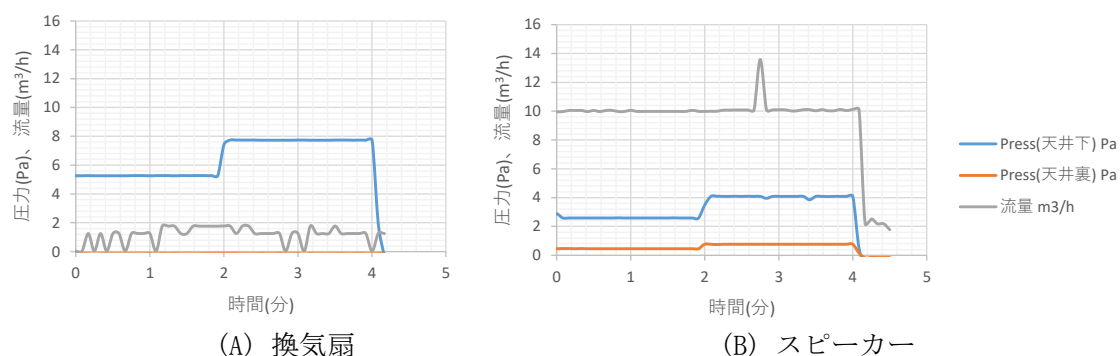


図 3.21 漏気量の測定結果

3.3.2 天井材の目地部からの漏気量実験

前章より、システム天井に取り付けられる機器本体からの漏気量は測定できたが、あらか

じめ天井材と隙間を設けて設置されるスピーカーを除いては、常温での圧力上昇環境下での漏気は見られなかった。そこで加熱環境下での天井裏への漏気量を予測するため、天井材の目地部を対象とした実験を行った。目地は、ボード紙にくるまれたボード端部をそのまま用いるのではなく、鉛直に切り戻した上で、隙間無く試験体中央で貼り合わせた。また、一般的な天井の施工方法に準拠して、シーリング処理を行わずに突き付けている。この際、天井材の加熱強度は、通常の耐火試験で用いられている標準加熱の他に、煙の拡大に伴う被害想定を対象としているため、比較的火災初期の低い加熱温度についても対象とした。

(1) 実験方法

加熱による天井ボード単体の収縮が要因となって発生する亀裂の程度および非加熱側への漏気量の測定を行うため、図 3.22 に示す実験装置を用いた。加熱は小型炉により ISO834-1 に準拠して行い、炉内温度計測用として熱電対を最低 1 点設置する。また試験体の非加熱側には、小型炉の加熱範囲を覆うことができる大きさの小型チャンバーを設置した。定置式複合ピトー管センサを小型チャンバーに取り付けることにより、全圧と静圧の差圧（動圧） P_V から流入する気体の流量 Q に換算した。 P_V から Q への換算式は以下の通りである。

$$Q = 3600\alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} P_V} \quad \text{ただし、} \rho = \rho_n \frac{T_n}{T} \quad (3.27)$$

ここで、 α は流量係数、 A は管路（エアロアイ）の断面積、 ρ は空気の密度 (kg/m^3)、 T は空気の絶対温度 (K)、 n は標準状態を表す。

この他に、図 3.22 の試験体図に示すように、試験体の一般部に加え、試験体に設けた切断面突付けによる目地部の裏面温度の測定を行った。加熱時の裏面温度測定用熱電対の断

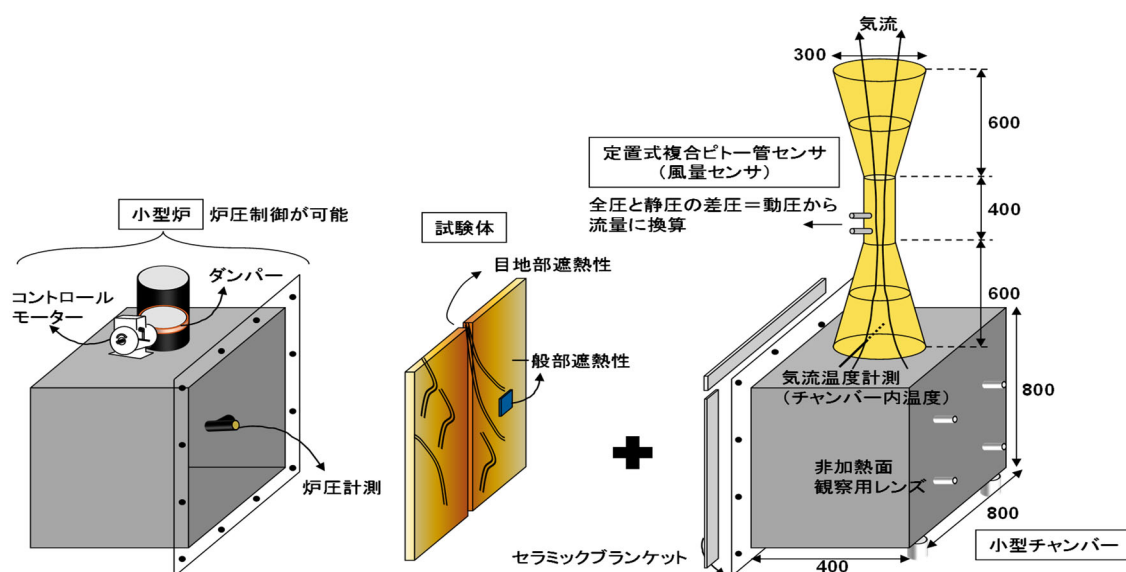


図 3.22 高温時漏気量測定で使用した実験模型

線等を考慮して、各部位において最低 2 点以上熱電対を設置し、各温度測定結果はその平均より算出することとした。

試験対象として、天井材として一般に用いられる普通せっこうボードを対象とし、厚み（9.5mm と 12.5mm）と設置方向の別（鉛直と水平）及び加熱強度（標準加熱と 0.7 倍加熱）を変化させて実験を行った。

(2) 実験結果

図 3.23 に目地部の温度上昇の測定結果を、図 3.24 に漏気量の測定結果を示す。参考に、強化せっこうボード、および、より厚みのあるボードの漏気量測定結果を並べて示す。

壁を想定した鉛直設置と天井を想定した水平設置の比較（図 3.24）について、水平設置では、漏気の始まる時間は若干遅くなるものの、それ以降の漏気量の拡大勾配は急となっている。

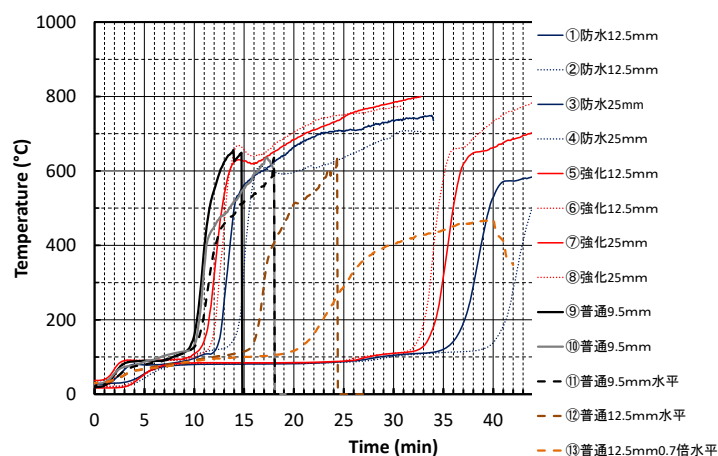


図 3.23 目地部の温度上昇測定結果

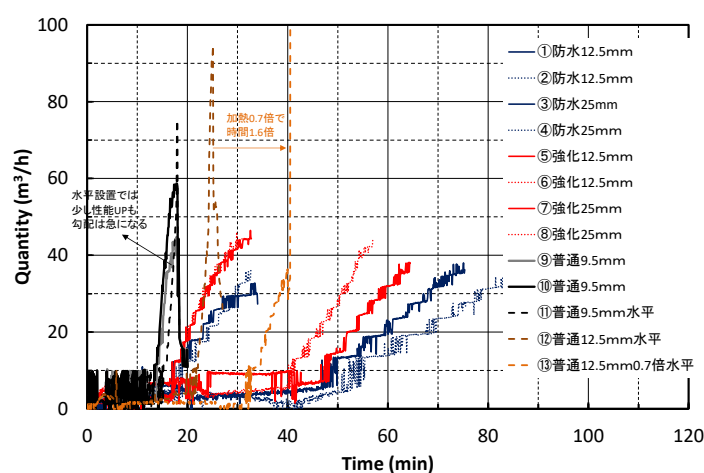


図 3.24 漏気量の測定結果

る。これは水平設置により、温度上昇に伴う亀裂や目地の開き等の劣化で、重力による変形・脱落が進みやすかったことが理由と考えられる。

無機質繊維の添加によって高温時のひび割れを抑えている強化せっこうボードと普通せっこうボードの比較についても同じことが言え、図 3.23 の温度上昇ではそれほど違いが見えない代わりに、図 3.24 の漏気量測定結果では、普通せっこうボードの方が、漏気が始まってからの拡大勾配が急となっている。

次に水平設置の普通せっこうボード 12.5mm を対象に、ISO 標準加熱と 0.7 倍加熱とした場合の比較について、図 3.24 の漏気量の拡大が、時間をおよそ 15 分程度平行移動したような傾向となっており、加熱温度を 0.7 倍とすることで耐火時間がおよそ 1.6 倍となる関係が見られる。これらを掛け合わせると $0.7 \times 1.6 = 1.12$ となり、漏気量についても、これまで温度上昇で言われていたような、温度時間曲線の積分値が指標となるといえる。

また、図 3.24 で漏気の始まる時間を図 3.23 に照らし合わせると、全ての試験体でおよそ 200°C に到達した時間となり、それ以後の漏気の拡大勾配は、図 3.25 に示すように、普通せっこうボードおよび水平設置の場合は、 600°C で脱落しそのときの漏気量はおよそ $40 \text{ m}^3/\text{分}$ 。強化せっこうボードの場合は、 800°C で漏気量 $40 \text{ m}^3/\text{分}$ となると考えられる。

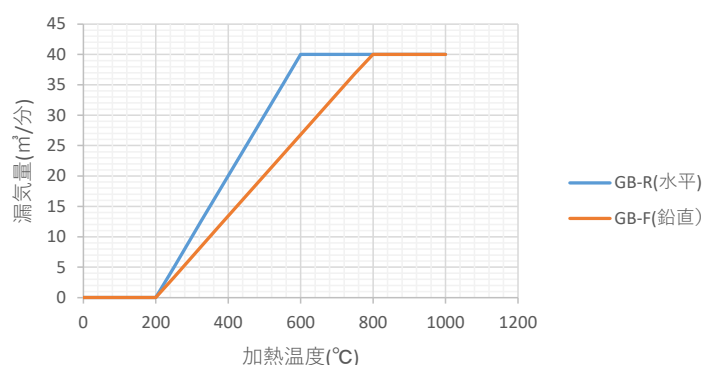


図 3.25 漏気量の実験回帰式（目地長さ 0.6m あたり）

なお、以上の結果は目地部分長さ（今回の実験では 0.6m）によって変わることから、単位目地部分長さあたりの漏気量 Q' を、天井表面の温度 T から推定する計算式を導くと次のようになる。

$$\text{普通せっこうボード・水平設置：} \quad Q' = \begin{cases} 0 & (T < 200^{\circ}\text{C}) \\ \frac{T-200}{6} & (200^{\circ}\text{C} \leq T < 600^{\circ}\text{C}) \\ \frac{200}{3} & (600^{\circ}\text{C} \leq T) \end{cases} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{分} \cdot \text{m}} \right) \quad (3.28)$$

$$\text{強化せっこうボード・鉛直設置：} \quad Q' = \begin{cases} 0 & (T < 200^{\circ}\text{C}) \\ \frac{T-200}{9} & (200^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C}) \\ \frac{200}{3} & (800^{\circ}\text{C} \leq T) \end{cases} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{分} \cdot \text{m}} \right) \quad (3.29)$$

すなわち、天井設置器具の周長長さ（天井板の目地部については胴縁などの裏当て材が設置されているものとする）と天井表面の温度 T から漏気量 Q' を推定することが可能となる。なお、普通せっこうボード・水平設置は最も漏気量が多く、また、強化せっこうボード・鉛直設置は最も漏気量が少ない組み合わせである。このことから、普通せっこうボード・鉛直設置および強化せっこうボード・水平設置の各組み合わせの下での漏気量は、式(3.28)および式(3.29)による推定結果の範囲内に収まるものと考えられる。

3.4 漏水が機能維持性能に及ぼす影響：床面の隙間等を通じた漏水量計測

建築物で火災が発生した場合の直接的な被害は、人的被害と物的被害に大別することができる。このうち物的被害は、さらに焼損、汚損、水損などに分類することができる。水損は、火災時に消防隊の放水や散水設備による散水などに建築物内に投入される消火水によって、火災加熱によって焼損する部分以外の部分にもたらされる損害である。消火水をかぶれば、収納物は基本的に再使用できなくなり、建築物の内装材や設備も交換が必要になる場合が多い。水損した物品によっては、交換に費用を要するだけでなく、代わりになる物品の調達に時間を要し、その建築物の機能が損なわれる場合がある。

火災被害を受けた建築物の機能維持性能を評価するには、建築物の内部に投入された消火水の拡がりを評価し、機能復旧に必要な費用や期間を推定できるようにする必要がある。投入された消火水は様々な形で建築物の内部に拡がるが、床面の部材同士の接合部にできた隙間や部材にできた亀裂を通じた下層への移動は、その中の主要なものである。こうした隙間等を通じた下層への水の移動速度 $\dot{V}_G$ は、ベルヌーイの定理に従って次式のように計算することができる。

$$\dot{V}_G = \alpha A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \alpha A \sqrt{2gh} \quad (3.30)$$

ここで、 α は開口流量係数、 A は隙間面積、 Δp は差圧、 ρ は通過する流体の比重、 g は重力加速度、 h は隙間の高低差である。このうち、 α は隙間近傍の流線が断面に対して垂直とならないことから生じる誤差を修正するための係数であり、基本的には隙間の形状に依存する。すなわち、 α は断面形状があらかじめ分かっている場合に利用可能な計算式であるが、漏水が生じる隙間の形状は様々であり、特定することは難しい。ただし、建築物の環境負荷性能を表す指標の一つである空間の気密性能の評価では、式(3.30)を修正した次の計算式を用いて単位時間当たりの漏気量を計算し、 α に相当する開口流量係数である α^* と係数 n が実測されている[3.13-3.25]。

$$\dot{V}_G = \alpha^* A \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.31)$$

図 3.26 は、RC 造および木造について、単位床面積あたりの有効隙間面積 $\alpha^* A / A_{floor}$ の実測

値の累積頻度分布を示している．ここでは、 α^*A/A_{floor} を以下に示す対数正規分布で近似した結果を併記しており、対数正規分布の係数 λ および ξ の値を表 3.8 に示す．

$$p = \Phi\left(\frac{\ln(\alpha^*A/A_{floor}) - \lambda}{\xi}\right) \quad (3.32)$$

漏水も、基本的には漏気が発生している部位と同じ部位から発生していることを考慮すれば、単位時間当たりの漏気量の計算のために実測された α^*A の値を利用できる可能性がある．そこで、密閉した箱型模型の底部に隙間を設け、そこを通じた漏気および漏水の双方の計測を行う．この時に決定される αA と α^*A の値を比較することで、漏気に関する過去の実測結果の漏水計算での利用可能性について調べた．

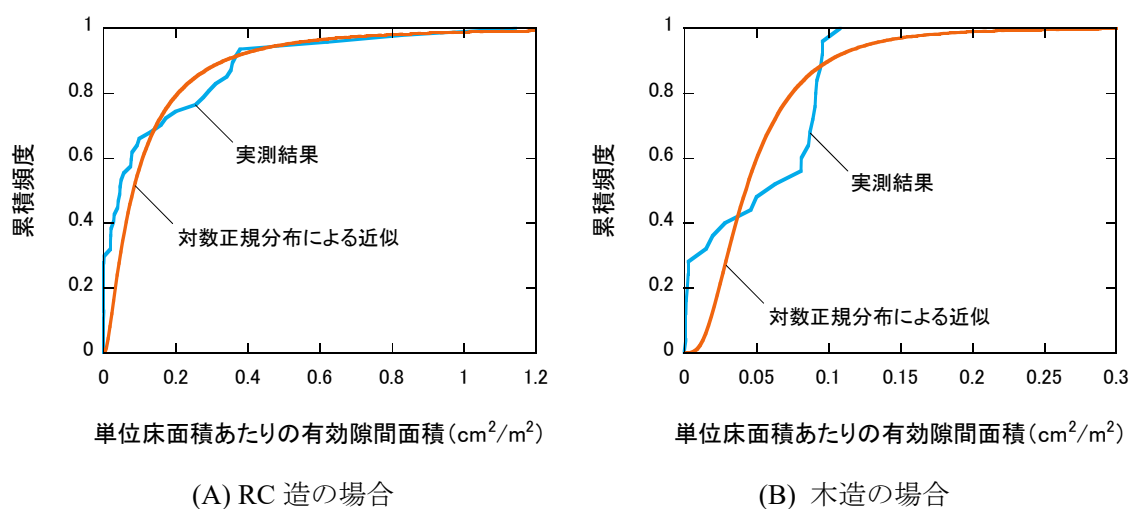


図 3.26 漏気に関する単位床面積あたりの有効隙間面積の累積頻度分布

表 3.8 漏気計測により得られた α^*A/A_{floor} の分布

	λ	ξ
RC 造	-2.50	1.10
木造	-3.16	0.67

3.4.1 実験方法

箱型模型は、厚さ 12mm の合板を組み合わせて作成した．その形状は、図 3.27 に示す通りであり、水平断面が 900mm×900mm の正方形、高さが 1800mm である．漏気および漏水のための隙間は、箱型模型の底部に設けた．ただし、漏水計測については、残留水の回収等の手間を考慮し、底部に長方形の隙間を加工した一辺 200mm 角の亚克力容器に水を投入して漏水を生じさせることとした．亚克力容器に設けた隙間が、箱型模型全体で唯一の

意図的に設けた隙間であり，漏気も専らこの隙間から生じるよう，漏気が生じやすい合板接合部は養生テープでふさいだ．アクリル容器に設けた隙間の形状は表 3.9 に示す通りであり，計 12 条件を考慮することとした，なお，箱型模型の中央部には水平方向にパンチングメタルの底を配置して，内部の空気の流れがアクリル容器の隙間に衝突することを回避させた．

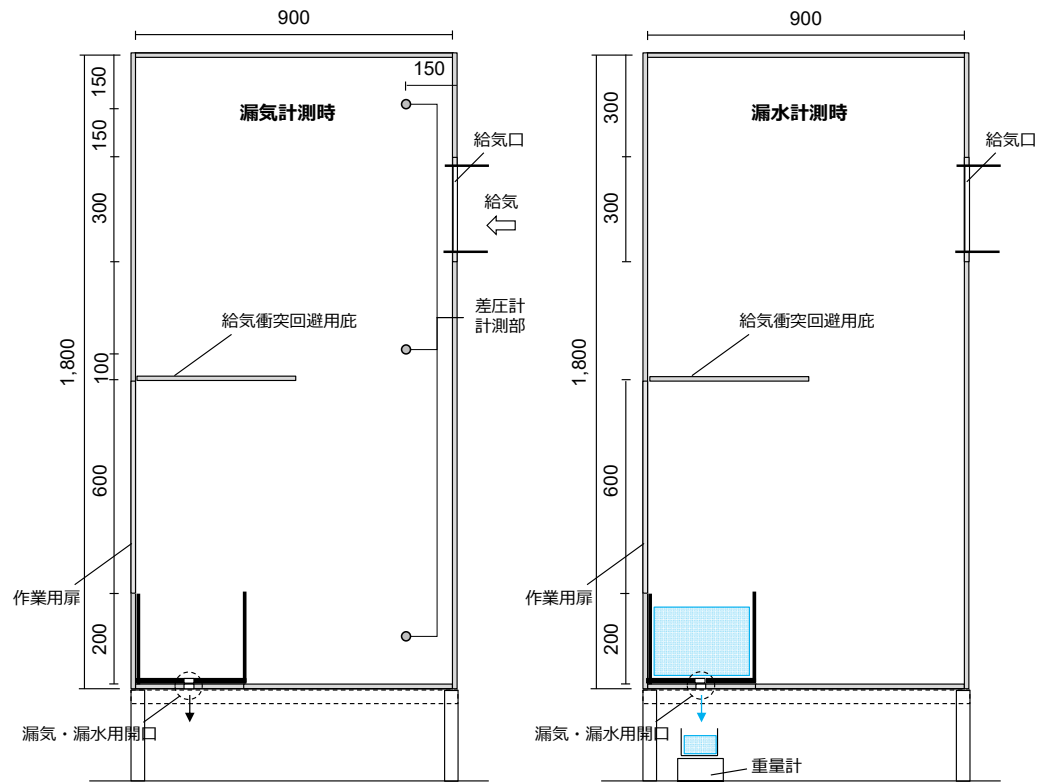


図 3.27 漏気および漏水計測に使用した箱型模型の鉛直断面

表 3.9 本実験で検討した隙間形状

実験番号	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)
1	50	1	10
2	50	3	10
3	50	5	10
4	50	10	10
5	50	5	30
6	50	10	30
7	100	1	10
8	100	3	10
9	100	5	10
10	100	10	10
11	100	5	30
12	100	10	30

(1) 漏気計測の手順

漏気については，箱型模型の上部に接続した送風機によって内外差圧 Δp を段階的に変化させ（概ね 20 から 90Pa にかけて，10Pa 刻みで変化させた），漏気速度すなわち送風速度との関係を調べた．模型底部から 150, 900, 1650mm の位置に配置された差圧計の計測結果は概ね一様であり，箱型模型の中央部にパンチングメタルの底を設けることで偏った空気の流れの形成は排除できていることを確認した．内外差圧 Δp は 0.02s 間隔でデータロガーに出力し，概ね安定的に推移することを確認した後の 1 分間の平均値を分析に使用した．

(2) 漏水計測の手順

漏水については，アクリル容器の隙間に目張りをした状態で約 4 リットルの水を入れ，目張りを外すことで流出を開始させた．漏水速度は，隙間から流れ出る水を受けた容器の重量の時間変化から換算した．計測に使用した重量計の計測精度は 0.1g であり，1s 間隔でデータロガーに出力した．漏水速度には一定のばらつきが生じることが予想されたことから，計測は各隙間形状につき 3 回行い，その平均値を分析に使用した．

3.4.2 実験結果

(1) 漏気計測

図 3.28 のデータ点は，表 3.9 に示した実験 3 から実験 6 までの模型区画の内外差圧 Δp と単位時間あたりの漏気量 $\dot{V}_G$ の関係を示している． Δp の増加とともに $\dot{V}_G$ も単調に増加しており，隙間部分の厚みがある場合ほど $\dot{V}_G$ は大きくなった．図 3.28 には，式(3.31)の開口流量係数 α^* と係数 n を回帰することで得られる $\dot{V}_G$ の計算結果を実線で併記してある．いずれの条件においても，良好に実験結果を回帰できた．

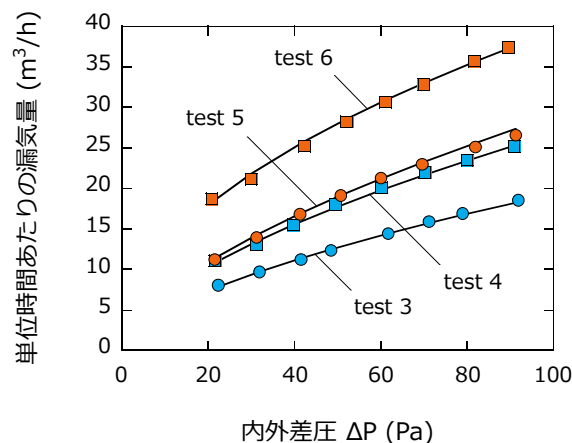


図 3.28 単位時間あたりの漏気量の計測値と回帰式による計算結果の比較

(2) 漏水計測

図 3.29 のデータ点は、表 3.9 に示した実験 3 から実験 6 において計測された経過時間と単位時間あたりの漏水量 $\dot{V}_G$ の関係を示している。計測開始から徐々に水位が低下することに伴い、 $\dot{V}_G$ も単調に減少し、最終的にゼロとなった。ただし、漏気の場合とは異なり、隙間部分の厚みが $\dot{V}_G$ に対して目立った影響を及ぼすことはなく、実験 3 と実験 5、また、実験 4 と実験 6 では、ほぼ同じような時間経過で $\dot{V}_G$ が推移した。図 3.29 には、式(3.30)の開口流量係数 α を回帰することで得られる $\dot{V}_G$ の計算結果を実線で併記してある。いずれの条件においても、良好に実験結果を回帰できたが、実験 3 と実験 5 については、水位が下がった段階で $\dot{V}_G$ の計測値が急激に低下しており、計算値との乖離が生じた。これは、水位が下がることにより、隙間部にかかる水圧が一様ではなくなったことに起因するものと考えられる。実験 4 と実験 6 でも同様の状況となっていた可能性はある。しかし、隙間寸法が大きく、短時間で水が流出したため、 $\dot{V}_G$ の変化が捉えられなかったものと考えられる。

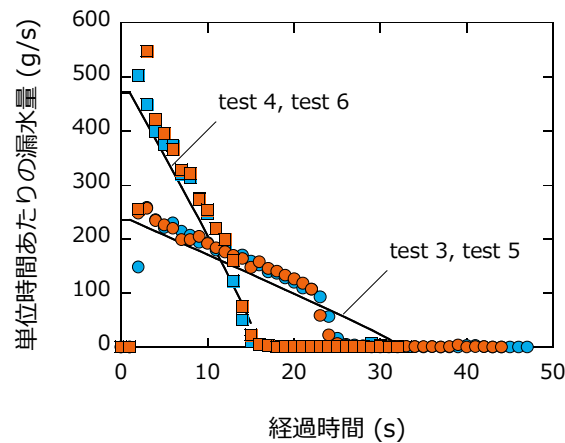


図 3.29 単位時間あたりの漏水量の計測値と回帰式による計算結果の比較

(3) 開口流量係数の比較

本実験で得られた、漏水に関する有効隙間面積 αA と漏気に関する有効隙間面積 $\alpha^* A$ の関係を整理した結果を図 3.30 に示す。全体的に、 αA の値に比べて $\alpha^* A$ の値が大きかったが、 $\alpha^* A$ が増加すれば αA も単調に増加する関係が見られた。こうした結果を線形回帰すると、以下のような関係式が得られる。

$$\alpha A = 0.769(\alpha^* A) - 0.308 \quad (3.33)$$

なお、漏水は主に室の下部で生じることを考慮すれば、実際に漏水に寄与する有効隙間面積 αA は、式(3.33)により計算される値からさらに小さくなるものと考えられる。仮に、室内の隙間が空間的に偏りなく分布しており、かつ、室の底面のみが漏水に寄与しているものとす

れば, α^*A (cm²)と αA (m²)の関係は次のように修正することができる.

$$\alpha A = \frac{A_R}{2A_R + 4H_R\sqrt{A_R}} \left\{ \frac{0.769(\alpha^*A) - 0.308}{10^4} \right\} \quad (3.34)$$

ここで, H_R は室の高さ, A_R は室の床面積である. 式(3.33)または式(3.34)を利用すれば, 図3.26のような実測結果に基づく分布から推定した α^*A を, 単位時間あたりの漏水量 $\dot{V}_G$ の計算に必要な有効隙間面積 αA に換算することができる.

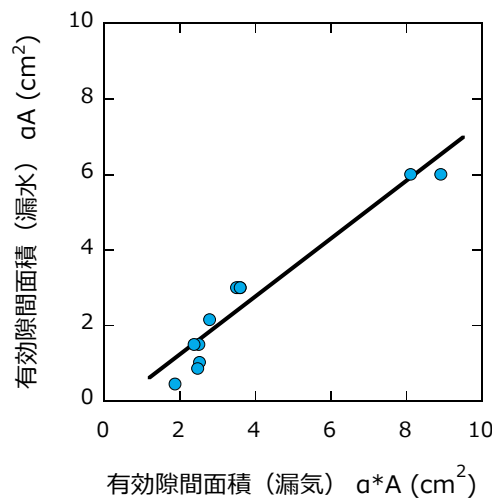


図 3.30 有効隙間面積の関係

3.5 まとめ

本章では, 2章に示した総合的なリスク評価の枠組みにおいて, 手続きが定まっていなかった機能維持性能の定式化を行った. また, 機能維持性能の評価を左右する諸事象について検討を加えた.

3.1節では, ある建築物の供用期間機能が, 火災被害による低減を経ても, なお保持されている割合を火災後の機能維持性能と定義した. 火災によって被害が発生し, そこから機能回復を図る過程にいくつかのシナリオを想定し, 各シナリオの発生を確率的に評価することで, 機能維持性能を評価できるようにした. ある事務所建築物を対象としたケーススタディを行い, 得られた機能維持性能を, 防火性能の一つである延焼防止性能の評価結果と比較したところ, 感度分析で検討した3項目(主要構造部の性能向上, スプリンクラー設備の設置, 室の区画化)のうち, 機能維持性能ではスプリンクラー設備の設置が, 延焼防止性能では室の区画化が, それぞれを改善する上で最も有効であるとの結果が得られた. このことは, 両者を改善させるために必要な対応が異なることを示している.

3.2節では, 新聞の記事データベース等を利用して過去の火災事例を収集し, 焼損した建

建築物の機能復旧にどの程度の期間を有するのかについて分析を加えた。火災被害を受けた建築物の復旧には、被害調査、清掃・解体、資金確保、設計・施工契約、設計、建築確認申請、施工など、多岐にわたる工程を経る必要があるが、その中の小さくない割合は施工によって占められると考えられる。そこで、復旧事例から抽出された復旧期間を統計から求まる施工期間で正規化した正規化復旧期間を求めたところ、正規化復旧期間を変数とする標準正規分布関数により、良好に累積復旧率を整理できることを確認した。なお、火災による被害を受けた後の復旧の容易さは、建築物の用途にも依存するところが多い。例えば、生産工場などの特殊な機能を有する機能は、内部に設置された設備が高価になりがちで、空間も一体的な使われ方をする場合が多いため、被害が大きくなる傾向にある。ただし、大企業が所有する建築物の場合には、経営体力に比較的余裕があり、早期に復旧にあたることができる場合が多いものと考えられる。また、商業施設、宿泊施設、病院などの不特定多数が利用する建築物では、火災により死者が発生した場合の利用者の心象に対する影響が大きく、経営の再開が困難になる場合があるものと考えられる。本検討ではこうした違いについて考慮することができていないため、今後さらなる検討が必要である。

3.3 節では、システム天井の遮煙性能が十分に考慮されていない実態を踏まえ、室内で火災が発生した場合に、天井に設置された設備器具との取り付け部および天井材の目地部から天井裏へ漏出する煙の量について実験的に調べた。天井材の目地部については、天井材の種類および設置方向に応じて煙の漏出の起こりやすさが異なることが明らかとなり、天井材表面の温度により漏出量を評価できるようにした。

3.4 節では、建築物の内部に投入された消火水の拡がりを予測するため、床面の部材同士の接合部にできた隙間や部材にできた亀裂の有効隙間面積 αA を推定する方法について検討した。実際の建築物で計測されている、漏気に関する有効隙間面積 α^*A の利用可能性を調べるため、同一の隙間を通じた漏気・漏水の双方に関する実験を行った。この結果、両者の間に一定の相関が存在することが分かり、計測結果を回帰することで α^*A から αA への換算式を得た。

3.1 節に示した手続きによる評価は、機能維持性能に関する基本的な内容の評価に留まっている。今後、高度化を図っていくには、3.2 節で明らかにした復旧期間に関する実態、ならびに 3.3 節および 3.4 節で得られた被害拡大要因に関する実験的知見をもとに、さらに検討を加えていく必要がある。

謝辞

3.4 節の漏気・漏水実験の実施にあたっては、国土技術政策総合研究所住宅研究部建築環境研究室長・西澤繁毅氏に貴重な助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 3.1) Cimellaro GP, Reinhorn AM, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience, *Engineering Structures* 32: 3639-3649, 2010.
- 3.2) 池畠・仁井・山口・田中・出口：避難安全評価のためのスプリンクラー設備の作動信頼性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.27-30, 2012.
- 3.3) 火災報告，総務省消防庁，1995-2014.
- 3.4) 建設大臣官房技術調査室監修：建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法，日本建築センター，1989.
- 3.5) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説，井上書院，2001.
- 3.6) Harada K, Kogure R, Matsuyama, Wakamatsu T. Equivalent fire duration based on time-heat flux area, *Proc. 4th AOFST*, pp. 513-524, 2000.
- 3.7) 国土交通省：建築物リフォーム・リニューアル統計，2016-2018.
- 3.8) 樋本・糸井川・岩見：相対リスクに基づく建築物の延焼防止性能検証，日本建築学会環境系論文集，Vol.84, No.764, pp.883-891, 2019.
- 3.9) 中野・多々納・藤見・梶谷・土屋：2004年新潟県中越地震における産業部門の経済被害推計に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.24, No.2, pp.289-298, 2007.
- 3.10) 国土交通省：建築着工統計調査報告，2012-2020.
- 3.11) Almufti I, Willford M. REDi Rating System – Resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings, ARUP, 2013.
- 3.12) ISO/TR 5925-2:2006 Fire test – Smoke-controlled door and shutter assemblies Part2: Commentary on the applicability of test conditions and the use of test data in a smoke containment strategy.
- 3.13) 村上・吉野・高瀬：住宅における気密性能の測定，生産研究速報集，33巻4号，pp.26-29, 1981.
- 3.14) 村上・吉野：住宅の気密性能に関する調査研究，日本建築学会環境系論文集，第325号，pp.104-115, 1983.
- 3.15) 鎌田・鈴木：寒冷地における木造住宅の構法改良に関する研究，室蘭工業大学研究報告.理工編，36巻，pp.105-127, 1986.
- 3.16) 倉渕・菅田・滝沢：集合住宅の気密性能と常時小風量換気設備の適用に関する研究，空気調和・衛生工学学会学術講演会論文集，第401号，pp.621-624, 1995.
- 3.17) 石井・飯沼・平間・林：航空機騒音を対象とした住宅の防音対策（2），林産試験場報，13巻2号，pp.1-7, 1999.
- 3.18) 服部・坂本：木造軸組住宅の納まり別気密性能と高気密化に関する研究，日本建築学会大会講演梗概集，pp.325-326, 2004.

- 3.19) 坂部・鈴木・伊庭・松岡・最上：枠組壁工法住宅の躯体を構成する部位の隙間特性の把握と気密性能の研究，空気調和・衛生工学学会学術講演会論文集，第 553 号，pp.353-356，2005.
- 3.20) 鳥海・倉渕・細野・小寺：既存集合住宅の改修による温熱・空気環境の改善効果に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.695-696，2009.
- 3.21) 田中・林・平野：伝統的木造住宅の省エネルギーに関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.751-752，2010.
- 3.22) 林・大沢：内部建材からの化学物質の室内侵入経路に関する測定，日本建築学会環境系論文集，第 77 巻，第 65 号，pp.375-382，2012.
- 3.23) 鳥海・倉渕・兼重：集合住宅における隙間の評価法に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 81 巻，第 722 号，pp.385-391，2015.
- 3.24) 鳥海・倉渕・長井・李・堀・川島・浅野：改修集合住宅の気密性能と温熱空気環境に関する研究 その 1 気密性能と換気量予測，空気調和・衛生工学学会学術講演会論文集，第 520 号，pp.213-216，2015.
- 3.25) 稲垣・膨・林：小学校教室内化学物質濃度の測定に基づく換気設備の効率的な運用方法の検討（第 5 報）学校計画が隙間換気量に及ぼす影響の検討，空気調和・衛生工学学会学術講演会論文集，第 721 号，pp.73-76，2018.

4. 防火性能評価のケーススタディ

本章では、2 章および 3 章に示した計算手続きを実装した防火性能評価プログラムを利用して、いくつかの建築物を対象としたケーススタディを行い、新たに開発した性能指標（F 値）の特徴を分析する。対象とする建築物の用途は事務所と物流倉庫である。それぞれ、規模の異なる建築物を 3 棟、計 6 棟（物流倉庫については、同一平面で階数を変更した検討を行った）設定して、防火上の仕様が性能に及ぼす影響を調べることにした。各建築物の基本的な条件は表 4.1 に示す通りである。

表 4.1 ケーススタディの対象とした建築物

対象建築物	立地	消防署からの 距離(百 m)	延床面積 (m ²)	階数	出火率 (件/(年・m ²))	構造種別
事務所 A	防火地域	2	3,409	3	0.487	S 造
事務所 B	防火地域	5	31,756	10	0.487	S 造
事務所 C	防火地域	20	31,251	7	0.487	S 造
物流倉庫 A-1	防火地域	20	11,910	4	1.067	S 造
物流倉庫 A-2	防火地域	20	8,940	3	1.067	S 造
物流倉庫 B-1	防火地域	20	30,750	4	1.067	S 造
物流倉庫 B-2	防火地域	20	23,100	3	1.067	S 造
物流倉庫 C	防火地域	20	44,100	3	1.067	S 造

本手法では、ある基準的な条件に対して、当該建築物が保持する相対的な防火性能を F 値として評価する。基準的な条件をどのような水準に設定するのかについては任意性があるが、本章では、建築基準法等の法令による要求水準と、概ね同等の水準を基準的な条件として設定することとした。こうして設定される基準的な条件に対して、以下に挙げる条件を変化させることで、それらが防火性能に及ぼす影響を調べることにした。

- ・ 敷地内の建築物の配置（敷地境界からの離隔距離）
- ・ 主要構造部（柱、梁、壁、床等）および扉の性能担保時間
- ・ 内装材料の不燃性（木質材料、難燃材料、準不燃材料、不燃材料）およびその厚み
- ・ 防火関連設備（排煙設備、スプリンクラー設備）の設置の有無
- ・ 在館者による消火訓練の実施の有無

4.1 事務所 A

4.1.1 計算条件

敷地配置を図 4.1 に示す。建築物は不整形な敷地に建ち、建築物の平面自体も不整形であ

る。敷地の2面は道路に面している。建築物の外壁は、いずれも延焼のおそれのある範囲に含まれていない。

構造断面を図4.2に示す。柱の断面寸法は各階で共通であるが、梁は2階部分だけ断面寸法が小さくなっている。

各階区画図（防火区画および排煙計画図）を図4.3に示す。1階部分はエントランスホールが大きな面積を占めており、事務室として利用される室は2、3階に配置されている。居室と廊下は、防火区画および防煙区画で区画されており、防煙区画内には機械排煙設備が設置されている。

以上のような条件をもとに、図4.4に示すように計算条件を設定した。計算上、設定された区画の数は20であり、これらの接続状況は図4.5に示す通りとなっている。エレベーターシャフトは堅穴として設定されており、煙等の伝搬経路となりうるが、避難経路として利用されるようにはなっていない。



図4.1 事務所A：敷地配置

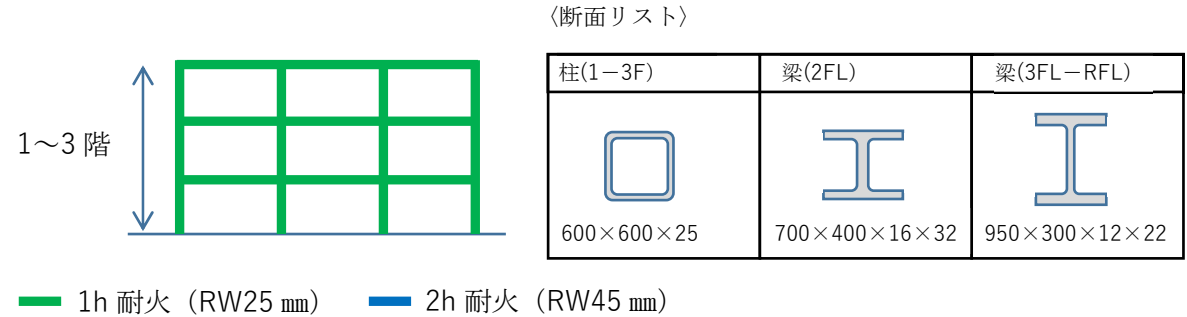


図4.2 事務所A：構造断面



1 階



2, 3 階

凡 例	
—	防火区画
—	防煙区画
	機械排煙(1m ³ /m ² /分)
	機械排煙(0.3m ³ /m ² /分)
	押出排煙
	無排煙

図 4.3 事務所 A：各階区画図（防火区画および排煙計画図）

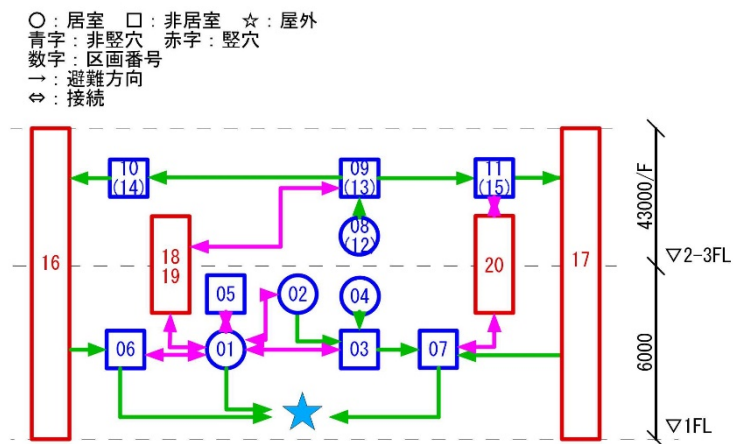


図 4.5 事務所 A：ネットワーク図

事務所 A で検討した比較条件は、表 4.2 に示す 7 条件である。各条件の着眼点を整理すると以下の通りとなる。

条件1： 基準条件において実施されていなかった在館者の消火訓練が実施された場合の性能の変化を調べている。

条件2： 居室の天井および壁に使用されていた準不燃材料が不燃材料に変更された場合の性能の変化を調べている。

条件3： 基準条件において設置が前提となっていたスプリンクラー設備（SP 設備）が設置されなかった場合の性能の変化を調べている。

表 4.2 事務所 A：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件						
			1:消火訓練の実施	2:内装材料変更	3:SP 設備設置	4:外窓強化	5:内部壁床強化	6:内部扉強化	7:被覆厚さ変更
内部構造	天井	普通コンクリート							
	壁	気泡コンクリート							
	床	普通コンクリート							
	延焼抵抗時間 (分)								
	壁	75	75	75	75	75	108	75	75
	扉	60	60	60	60	60	60	75	60
	床	75	75	75	75	75	108	75	75
内装	総発熱量 (MJ)	0.44×10^6	0.44×10^6	0.37×10^6	0.44×10^6	0.44×10^6	0.44×10^6	0.44×10^6	0.44×10^6
	総表面積 (m ²)	4,627	4,627	4,096	4,627	4,627	4,627	4,627	4,627
外周	離隔距離 (m)	4	4	4	4	4	4	4	4
	延焼抵抗時間 (分)								
	壁	30	30	30	30	30	30	30	30
	窓	0	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	SP 設備	あり	あり	あり	なし	あり	あり	あり	あり
躯体	被覆厚さ (mm)								
	柱	25	25	25	25	25	25	25	65
	梁	25	25	25	25	25	25	25	60
他	消火訓練	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

- 条件4：延焼のおそれのある範囲に含まなかったため、0分となっていた外壁開口部の窓の延焼抵抗時間を20分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件5：建築物内部の壁および床の延焼抵抗時間（準耐火構造）を75分から108分に延長した場合の性能の変化を調べている。このうち、108分（準耐火構造）は、耐火構造の性能確認において、加熱時間を2割増しとすることで加熱終了後の放置・性能維持の確認を免除する耐火試験の規定に基づいており、90分（耐火構造）に相当するものとして設定している。
- 条件6：建築物内部の扉の延焼抵抗時間を60分から75分に延長した場合の性能の変化を調べている。扉の延焼抵抗時間を75分とすることで、壁および床との間の性能差がなくなり、区画突破確率の扉の性能への依存度が下げられている。
- 条件7：条件7では、鉄骨柱および梁を被覆する吹き付けロックウールの厚みを25mmから60mmに変更された場合の性能の変化を調べている。

4.1.2 計算結果

事務所Aに関する計算結果を表4.3および図4.6に示す。本手法では、出火防止性能 F_1 と消火活動支援性能 F_6 を評価できるようになっていないことから、残る5つのF値の計算結果を示してある。

表 4.3 事務所 A に関する計算結果

F 値	被害指標	比較条件						
		1：消 火訓練 の実施	2：内 装材料 変更	3：SP 設備設 置	4：外 窓強化	5：内 部壁床 強化	6：内 部扉強 化	7：被 覆厚さ 変更
出火防止性能 F_1	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F_2	火災成長確率	2.233	1.264	0.309	1.008	1.109	0.972	1.007
倒壊防止性能 F_3	崩壊部分面積	3.367	1.331	0.234	1.000	1.065	0.979	2.735
延焼防止性能 F_4	延焼確率	3.385	1.383	0.233	1.004	1.070	0.980	0.971
避難安全性能 F_5	避難不能者数	1.033	1.335	0.745	1.051	1.024	0.959	0.987
消防活動支援性能 F_6	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F_7	改修工事費	4.744	1.008	0.710	1.017	1.005	0.999	0.998

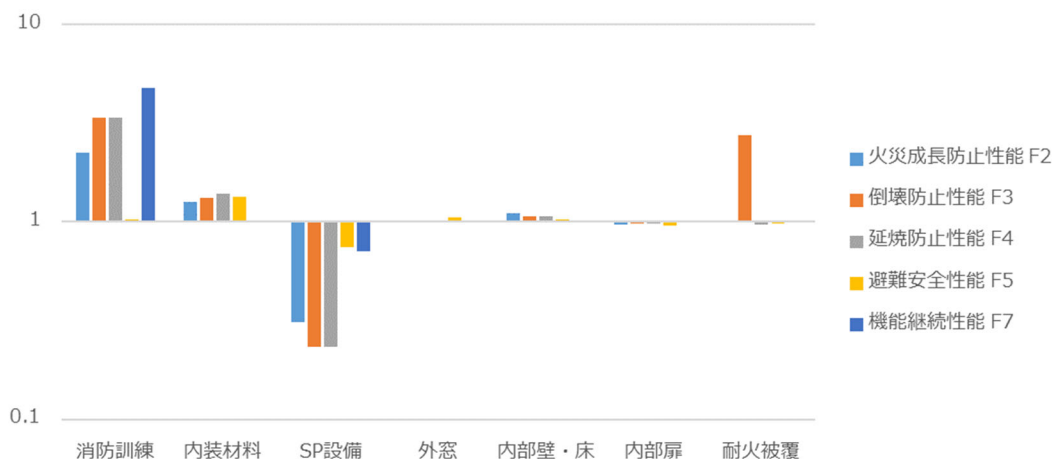


図 4.6 事務所 A に関する計算結果

- 条件1：消火訓練の実施は、火災成長防止性能 F_2 、倒壊防止性能 F_3 、延焼防止性能 F_4 、機能継続性能 F_7 で、比較的大きな性能向上につながる結果が得られた。これは、消火訓練を実施することにより、在館者による消火活動への参加率および奏効率が向上することによるものである。ただし、避難安全性能 F_5 の向上は見られなかった。これは、本手法において、消火活動による火災成長速度の低減効果を評価できるようになっておらず、消火に失敗した火災については、消火活動が行われなかった場合と同じ火源からの安全性を評価することになっているためと考えられる。
- 条件2：内装材料を不燃化した結果、火災成長防止性能 F_2 、倒壊防止性能 F_3 、延焼防止性能 F_4 、避難安全性能 F_5 で性能向上につながった。ただし、その程度は条件1ほど顕著ではなかった。条件1の場合とは異なる点として、機能継続性能 F_7 の向上が見られなかったことが挙げられる。これは、本手法において、区画単位で機能維持性能の評価を行っている点と関係しており、事務所Aの区画の規模が比較的大きいために、本来であれば機能維持上の効果が大い、内装不燃化による焼損範囲の局所化の効果を適切に評価できていなかった可能性がある。
- 条件3：事務所Aでは、基準条件において、既にスプリンクラー設備が設置されているものとしていたため、条件3ではこれを外した場合の効果を検証している。このため、F値は、いずれの個別性能でも1より小さくなった。これを、スプリンクラー設備が設置されていたことによる性能向上と見れば、その程度は、火災成長防止性能 F_2 、倒壊防止性能 F_3 、延焼防止性能 F_4 において大きいとみなすことができる。
- 条件4：外窓の強化については、延焼防止性能 F_4 を含め、いずれの個別性能の向上にもつながらなかった。延焼防止性能 F_4 の向上につながらなかった理由は、本手法において、延焼防止性能の中でも加害防止性能に着目をした評価を行っているためである。すなわち、外窓の強化は、専ら外部からの加熱による延焼を防止するために

機能し、内部の火災による屋外への突破を防止する効果を評価できていないためである。この点は、評価手法の改良が必要である。

条件5： 内部構造のうち、壁および床の強化は、わずかではあるが火災成長防止性能 F_2 、倒壊防止性能 F_3 、延焼防止性能 F_4 の向上につながった。これは、壁および床の強化が、内部で発生した火災の延焼拡大の防止に寄与したことを示している。ただし、その効果が限定的であった理由は、延焼経路となりうる扉が強化されないままに残っていたためである。

条件6： 内部構造のうち、扉の強化は、いずれの個別性能の F 値の向上にも寄与しなかった。もともと 60 分であった延焼抵抗時間が 75 分変更されたものの、変更幅が小さかったことが、性能向上につながらなかった理由と考えられる。条件 5 において、壁および床の強化がいくぶん F 値の向上に寄与したことを考慮すれば、扉の強化に壁および床の強化を組み合わせることが、 F 値の向上には有効であった可能性がある。なお、 F 値がいくぶん 1 を下回っている理由は、個別性能の評価にモンテカルロシミュレーションを利用することで計算結果にばらつきが生じるためであり、性能低下を表すものではない。

条件7： 柱および梁の耐火被覆の厚みの変更は、倒壊防止性能 F_3 を大きく向上させた。ただし、その他の個別性能の F 値には変化が見られず、複数の個別性能の向上につながった消防訓練の実施（条件 1）や内装材の強化（条件 2）などとは対照的な結果となった。

4.2 事務所 B

4.2.1 計算条件

敷地配置を図 4.7 に示す。建築物の平面形状は長方形で、同じく長方形の敷地に建っている。敷地の 2 面は道路に面している。建築物の外壁は、いずれも延焼のおそれのある範囲に含まれていない。

構造断面を図 4.8 に示す。主要構造部である柱および梁の断面寸法は、建築基準法の要求に従って、最上階から 4 層分までが耐火時間 1 時間、それより下の層が耐火時間 2 時間の耐火性能を満たす仕様となっている。

各階区画図（防火区画および排煙計画図）を図 4.9 に示す。1 階部分はエントランスホールと店舗が、2 階部分はロビーとラウンジがそれぞれ大きな面積を占めている。事務室として利用される室は 3 階から 10 階にかけて配置されている。2 階部分を除き、居室と廊下は、防火区画および防煙区画で区画されており、防煙区画内には機械排煙設備が設置されている。

以上のような条件をもとに、図 4.10 に示すように計算条件を設定した。計算上、設定さ

れた区画の数は 50 であり、これらの接続状況は図 4.11 に示す通りとなっている。エレベーターシャフトは堅穴として設定されており、煙等の伝搬経路となりうるが、避難経路として利用されるようにはなっていない。

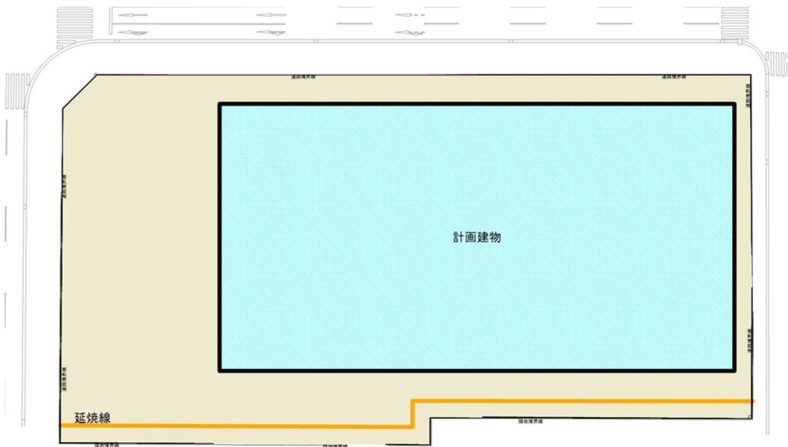


図 4.7 事務所 B：敷地配置

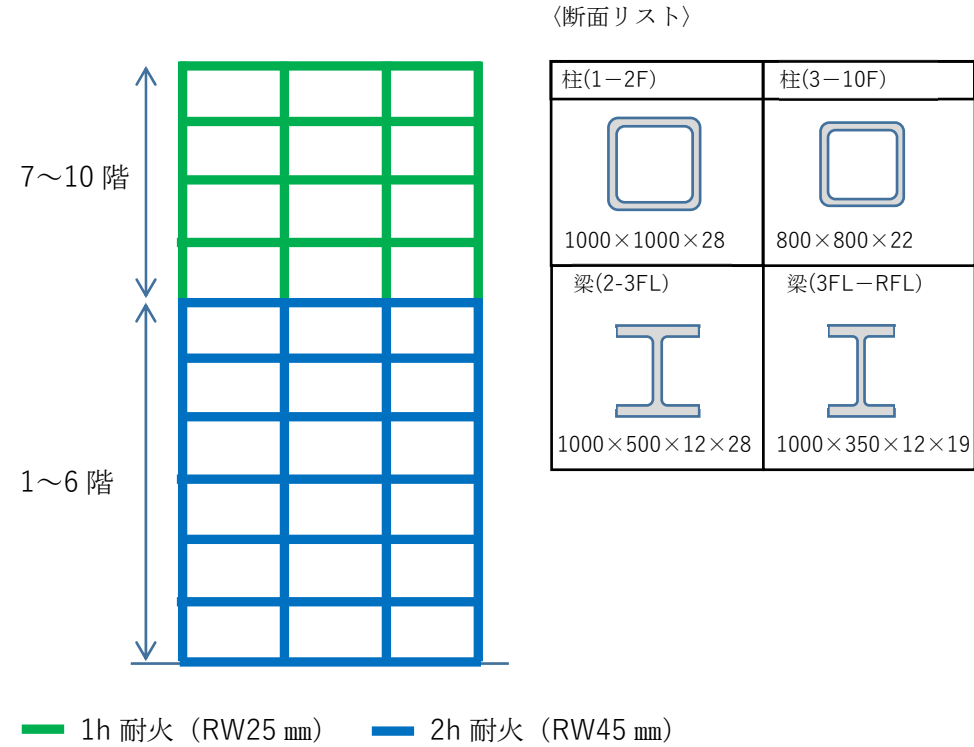
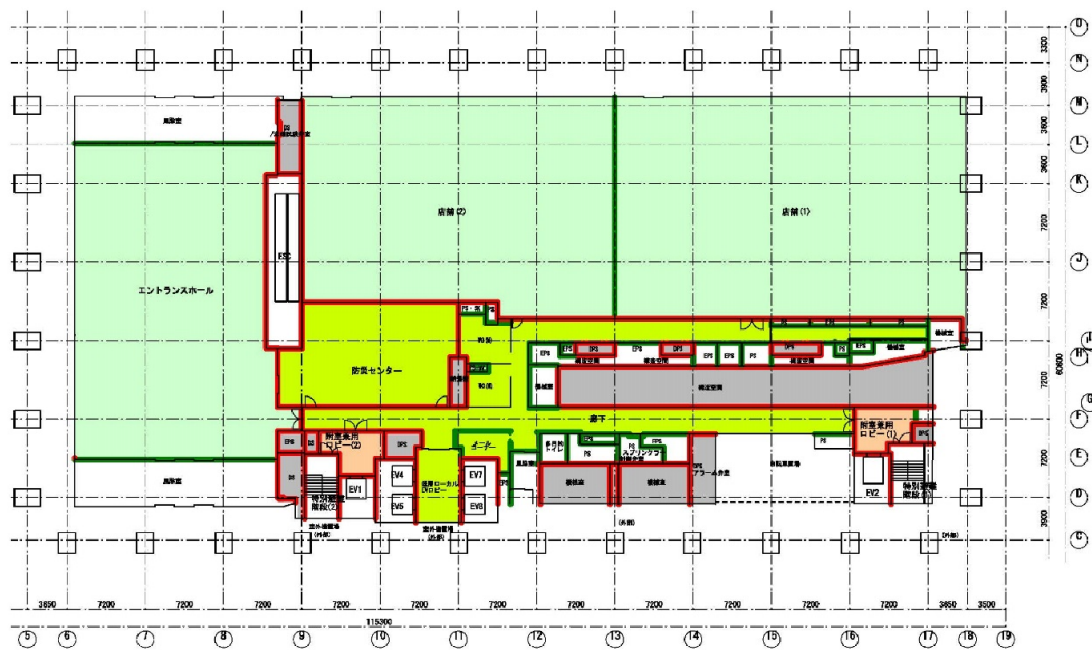
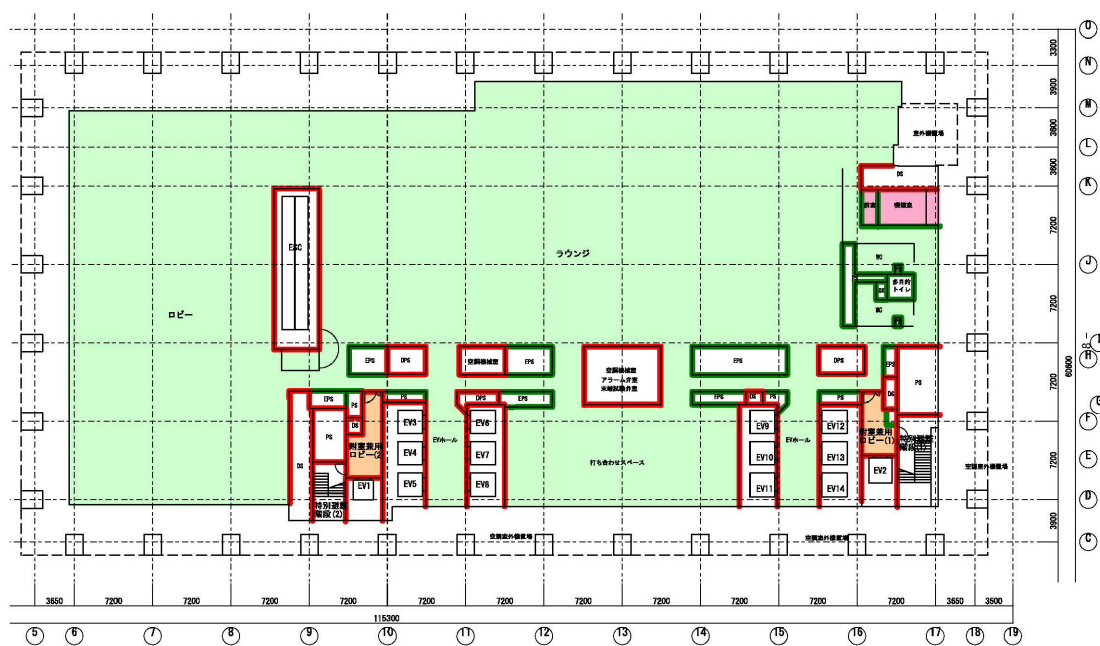


図 4.8 事務所 B：構造断面



1 階



2 階

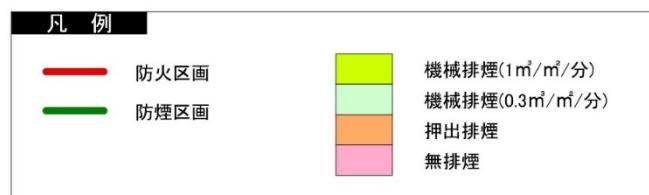


図 4.9 (続く) 事務所 B: 各階区画図 (防火区画および排煙計画図)



3-6 階



7-10 階

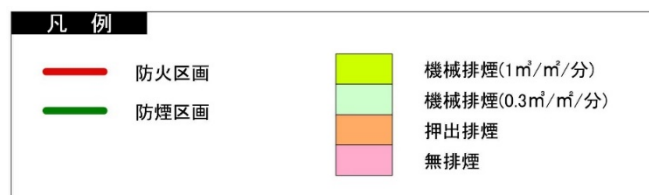
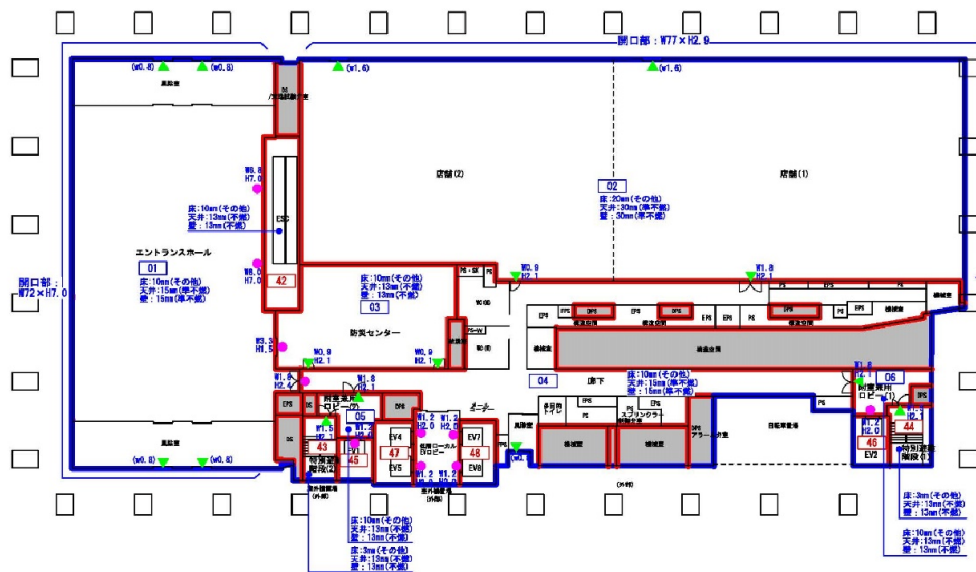
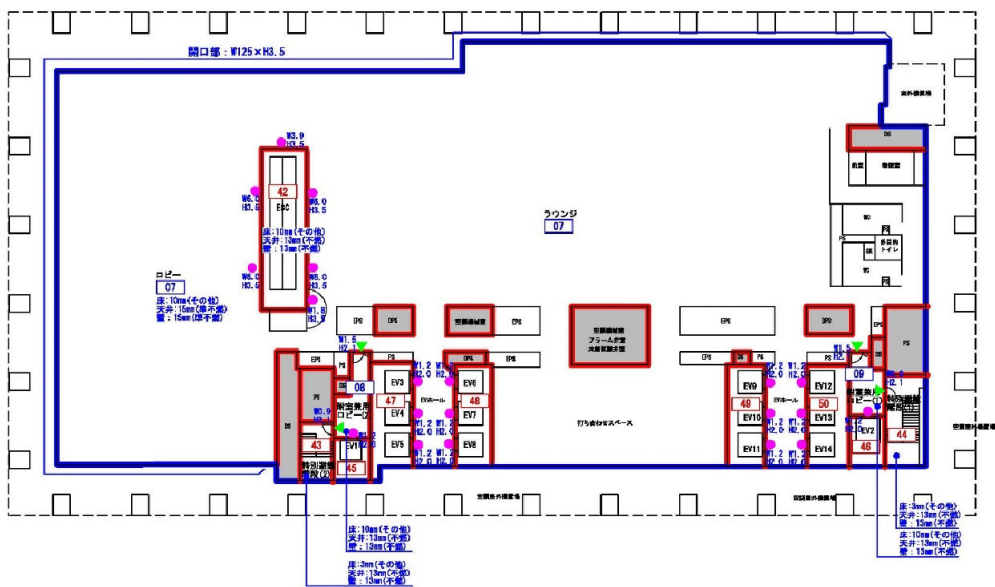


図 4.9 (承前) 事務所 B : 各階区画図 (防火区画および排煙計画図)



1 階



2 階

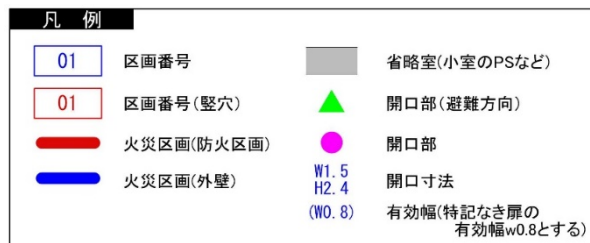
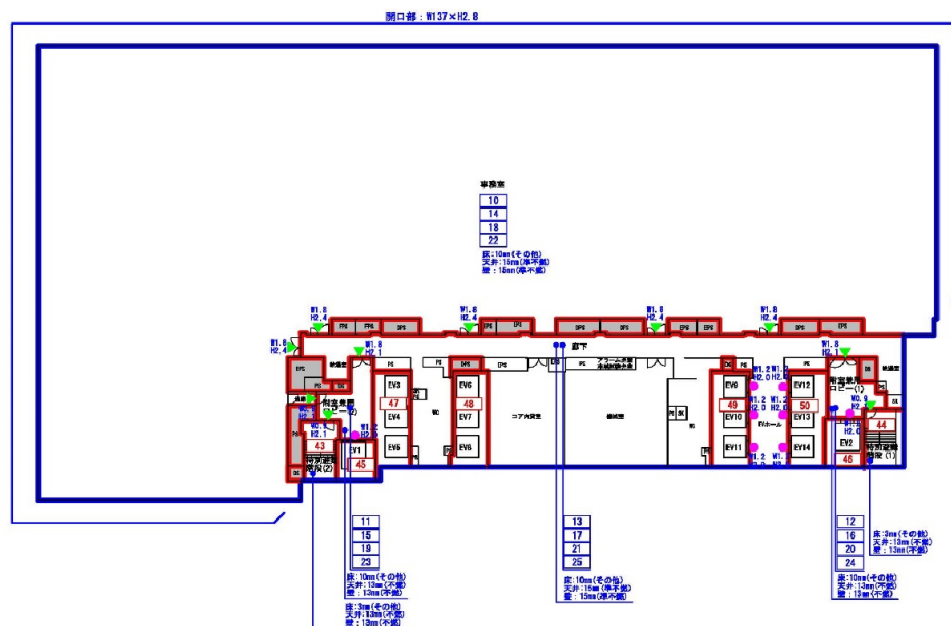
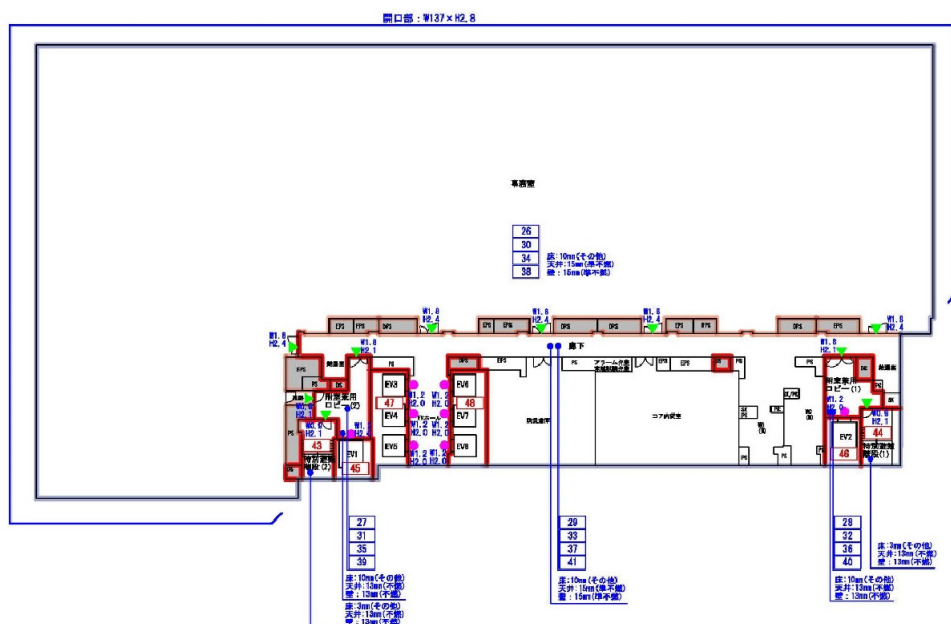


図 4.10 (続く) 事務所 B : 条件設定図



3-6 階



7-10 階

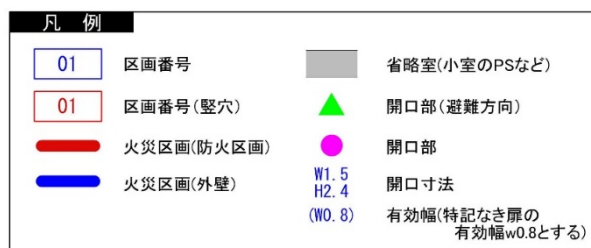


図 4.10 (承前) 事務所 B: 条件設定図

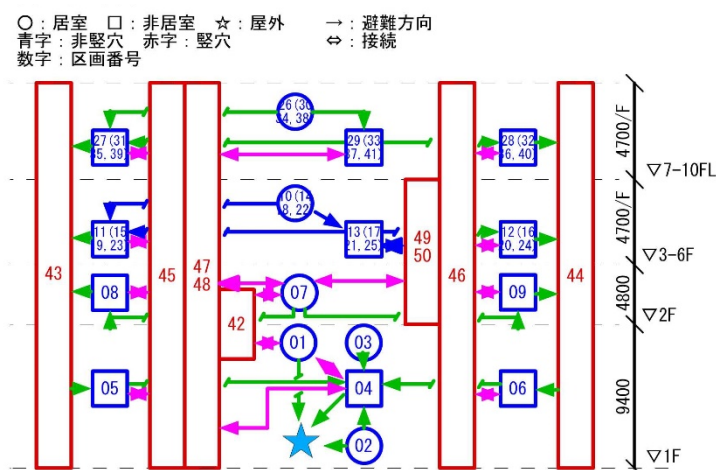


図 4.11 事務所 B：ネットワーク図

事務所 B で検討した比較条件は、表 4.4 に示す 7 条件であり、事務所 A の場合から変更はない。各条件の着眼点をあらためて整理すると以下の通りとなる。

条件1： 基準条件において実施されていなかった在館者の消火訓練が実施された場合の性能の変化を調べている。

条件2： 居室の天井および壁に使用されていた準不燃材料が不燃材料に変更された場合の性能の変化を調べている。

条件3： 基準条件において設置が前提となっていたスプリンクラー設備（SP 設備）が設置されなかった場合の性能の変化を調べている。

表 4.4 事務所 B：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件						
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP 設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更
内部構造	天井	軽量コンクリート（れんが層）							
	壁	気泡コンクリート							
	床	普通コンクリート							
	延焼抵抗時間（分）								
	壁	75	75	75	75	75	108	75	75
	扉	60	60	60	60	60	60	75	60
	床	75	75	75	75	75	108	75	75
内装	総発熱量 (MJ)	3.65×10^6	3.65×10^6	3.16×10^6	3.65×10^6	3.65×10^6	3.65×10^6	3.65×10^6	3.65×10^6
	総表面積 (m ²)	40,597	40,597	36,646	40,597	40,597	40,597	40,597	40,597
外周	離隔距離 (m)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	延焼抵抗時間（分）								
	壁	30	30	30	30	30	30	30	30
	窓	0	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	SP 設備	あり	あり	あり	なし	あり	あり	あり	あり
躯体	被覆厚さ (mm)								
	柱	25	25	25	25	25	25	25	65
	梁	25	25	25	25	25	25	25	60
他	消火訓練	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

条件4： 延焼のおそれのある範囲に含まなかったため、0分となっていた外壁開口部の窓の延焼抵抗時間を20分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件5： 建築物内部の壁および床の延焼抵抗時間を75分から108分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件6： 建築物内部の扉の延焼抵抗時間を60分から75分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件7： 条件7では、鉄骨柱および梁を被覆する吹き付けロックウールの厚みを25mmから60mmに変更された場合の性能の変化を調べている。

4.2.2 計算結果

事務所Bに関する計算結果を表4.5および図4.12に示す。本手法では、出火防止性能 F_1 と消火活動支援性能 F_6 を評価できるようになっていないことから、残る5つのF値の計算結果を示してある。

表 4.5 事務所Bに関する計算結果

F 値	被害指標	比較条件						
		1：消 火訓練 の実施	2：内 装材料 変更	3：SP 設備設 置	4：外 窓強化	5：内 部壁床 強化	6：内 部扉強 化	7：被 覆厚さ 変更
出火防止性能 F_1	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F_2	火災成長確率	1.095	1.200	0.649	1.013	0.944	0.924	0.970
倒壊防止性能 F_3	崩壊部分面積	3.130	1.380	0.217	1.066	0.940	0.954	1.008
延焼防止性能 F_4	延焼確率	3.105	1.446	0.219	1.048	0.935	0.945	0.988
避難安全性能 F_5	避難不能者数	1.219	1.441	0.464	1.064	1.035	1.009	0.998
消防活動支援性能 F_6	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F_7	改修工事費	4.794	1.029	0.656	1.033	1.001	0.998	1.004

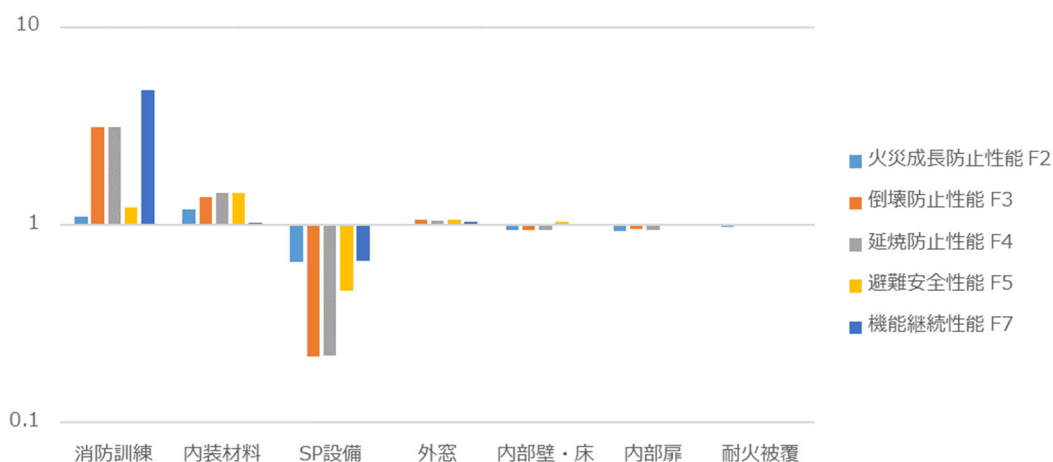


図 4.12 事務所Bに関する計算結果

- 条件1：消火訓練の実施は、全ての個別性能の向上につながる結果が得られた。事務所 A の場合との相違は、事務所 B における性能向上効果が、火災成長防止性能 F_2 については小さく、避難安全性能 F_5 については大きく評価された点である。この理由を特定することはできていないが、建築物や計算単位となる区画の規模、在館者数の多さ（事務所 B の方が在館者数が多く、避難時間が長くなる）、または区画同士の接続関係など、事務所 A と事務所 B の間の平面計画の差異に起因していると考えられる。
- 条件2：内装材料を不燃化した結果、火災成長防止性能 F_2 、倒壊防止性能 F_3 、延焼防止性能 F_4 、避難安全性能 F_5 で性能向上につながった。ただし、事務所 A の場合と同様、その程度は条件 1 ほど顕著ではなかった。また、個別性能の間で性能向上の程度に大きな違いは表れなかった。
- 条件3：事務所 B でも、事務所 A の場合と同様、基準条件において既にスプリンクラー設備が設置されているものとしていたため、条件 3 ではこれを外した場合の効果を検証している。全ての個別性能で F 値の低下（この場合は性能の向上）が見られたが、事務所 A の場合に比べると、火災成長防止性能 F_2 の向上の程度が小さかった。これは、条件 1 において、消火訓練の実施による F_2 の向上効果が限定的であったことにも対応している。
- 条件4：外窓の強化については、延焼防止性能 F_4 を含め、いずれの個別性能の向上にもつながらなかった。延焼防止性能 F_4 の向上につながらなかった理由は、事務所 A の場合と同様、本手法において、延焼防止性能の中でも加害防止性能に着目をした評価を行っているためである。
- 条件5：内部構造のうち、壁および床の強化については、事務所 A の場合とは異なり、いずれの個別性能の向上にもつながらなかった。この理由は、事務所 A に比べて事務所 B に規模の大きな区画が多く（区画の最大床面積は、事務所 A で約 $1,000\text{m}^2$ 、事務所 B で約 $2,700\text{m}^2$ ）、火災となった場合の継続時間が長くなるため、壁および床の延焼抵抗時間を 108 分とする程度では、十分な性能向上につながらなかったためと考えられる。
- 条件6：内部構造のうち、扉の強化は、いずれの個別性能の F 値の向上にも寄与しなかった。この結果は、事務所 A の場合と同様であった。
- 条件7：柱および梁の耐火被覆の厚みの変更は、いずれの個別性能の F 値の向上にも寄与しなかった。これは、事務所 A において、倒壊防止性能 F_3 が大きく向上した結果とは対照的であった。この理由は条件 5 の場合と同様であり、事務所 A に比べて事務所 B に規模の大きな区画が多く、火災となった場合の継続時間が長くなるためと考えられる。

4.3 事務所 C

4.3.1 計算条件

敷地配置を図 4.13 に示す。建築物の平面形状は長方形で、同じく長方形の敷地に建っている。建築物の外壁は、いずれも延焼のおそれのある範囲に含まれていない。

構造断面を図 4.14 に示す。主要構造部である柱および梁の断面寸法は、建築基準法の要

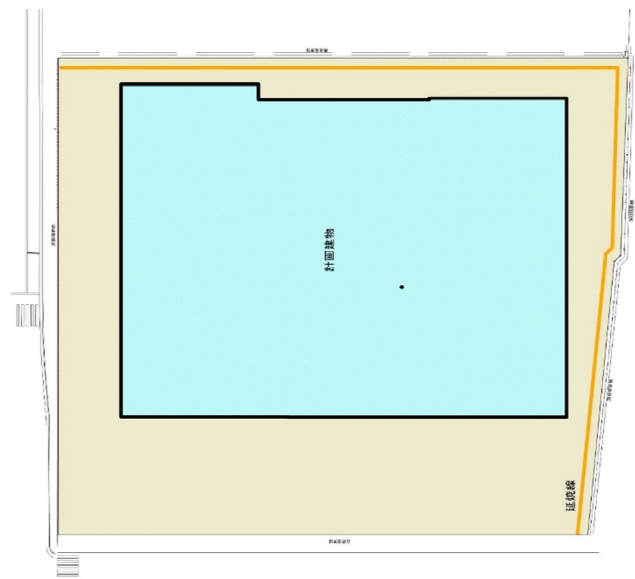


図 4.13 事務所 C：敷地配置

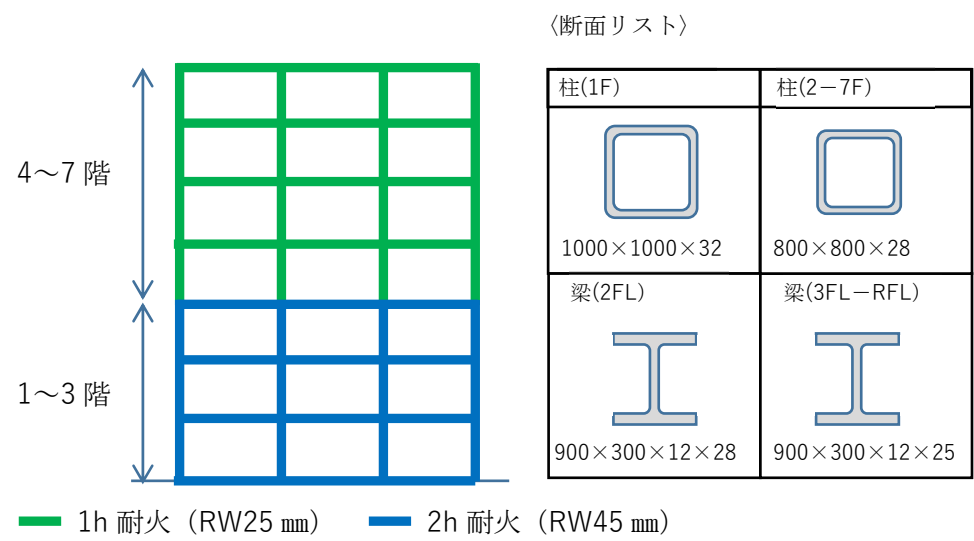


図 4.14 事務所 C：構造断面

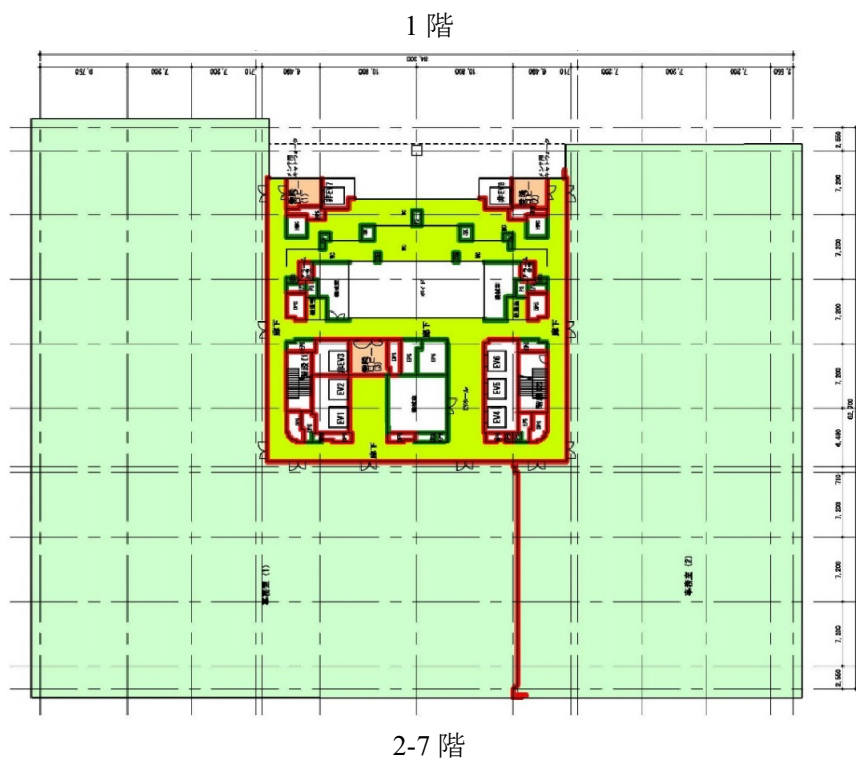
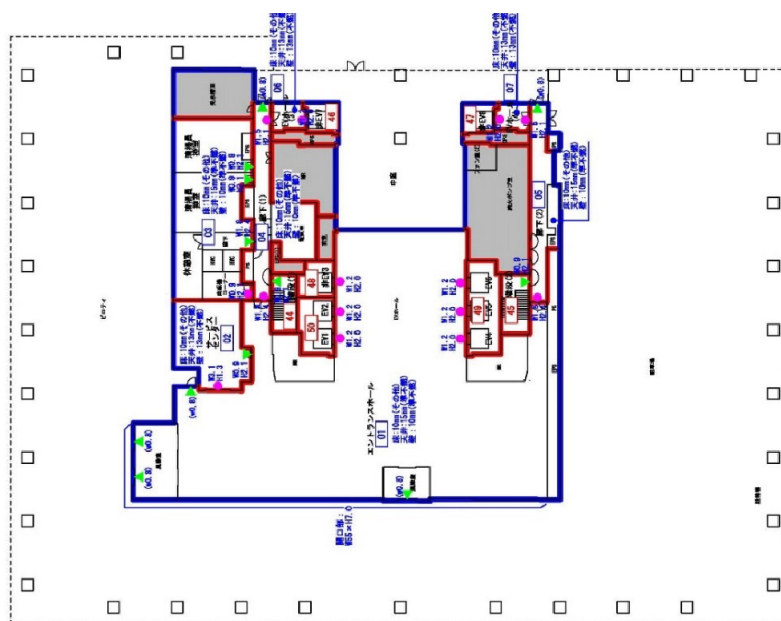
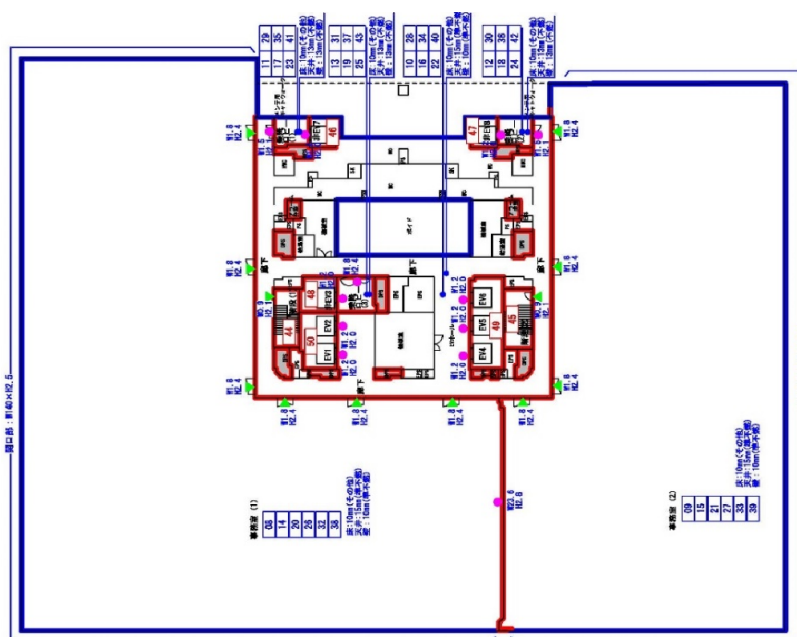


図 4.15 事務所 C：各階区画図（防火区画および排煙計画図）



1 階



2-7 階

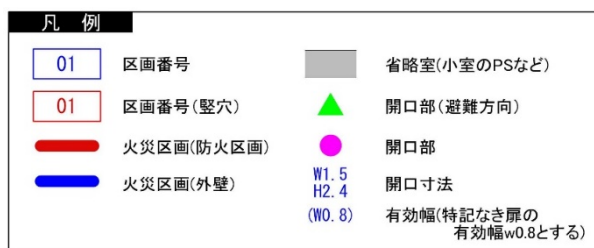


図 4.16 事務所 C : 条件設定図

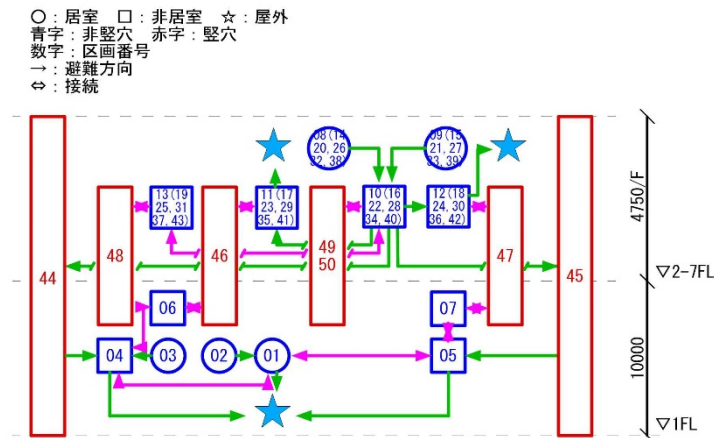


図 4.17 事務所 C：ネットワーク図

求に従って、最上階から 4 層分までが耐火時間 1 時間、それより下の層が耐火時間 2 時間の耐火性能を満たす仕様となっている。

各階区画図（防火区画および排煙計画図）を図 4.15 に示す。1 階部分は、大部分がピロティ空間となっており、そのうちの一部分が駐車場として利用されている。1 階部分の屋内空間はエントランスホールとして利用され、事務室として利用される室は 2 階以上の階に配置されている。居室と廊下は、防火区画および防煙区画で区画されており、防煙区画内には機械排煙設備が設置されている。

以上のような条件をもとに、図 4.16 に示すように計算条件を設定した。計算上、設定された区画の数は 50 であり、これらの接続状況は図 4.17 に示す通りとなっている。エレベーターシャフトは堅穴として設定されており、煙等の伝搬経路となりうるが、避難経路として利用されるようにはなっていない。

事務所 C で検討した比較条件は、表 4.6 に示す 7 条件であり、事務所 A、B の場合から変更はない。各条件の着眼点をあらためて整理すると以下の通りとなる。

- 条件1： 基準条件において実施されていなかった在館者の消火訓練が実施された場合の性能の変化を調べている。
- 条件2： 居室の天井および壁に使用されていた準不燃材料が不燃材料に変更された場合の性能の変化を調べている。
- 条件3： 基準条件において設置が前提となっていたスプリンクラー設備（SP 設備）が設置されなかった場合の性能の変化を調べている。
- 条件4： 延焼のおそれのある範囲に含まなかったため、0 分となっていた外壁開口部の窓の延焼抵抗時間を 20 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件5： 建築物内部の壁および床の延焼抵抗時間を 75 分から 108 分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件6： 建築物内部の扉の延焼抵抗時間を 60 分から 75 分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件7： 条件 7 では、鉄骨柱および梁を被覆する吹き付けロックウールの厚みを 25 mm から 60 mmに変更された場合の性能の変化を調べている。

表 4.6 事務所 C：計算条件一覧

分類	項目		基準条件	比較条件						
				1:消火訓練の実施	2:内装材料変更	3:SP 設備設置	4:外窓強化	5:内部壁床強化	6:内部扉強化	7:被覆厚さ変更
内部構造	天井		軽量コンクリート（れんが層）							
	壁		気泡コンクリート							
	床		普通コンクリート							
	延焼抵抗時間（分）	壁	75	75	75	75	75	108	75	75
		扉	60	60	60	60	60	60	75	60
		床	75	75	75	75	75	108	75	75
内装	総発熱量(MJ)		3.44×10^6	3.44×10^6	2.97×10^6	3.44×10^6	3.44×10^6	3.44×10^6	3.44×10^6	3.44×10^6
	総表面積 (m ²)		39,819	39,819	35,845	39,819	39,819	39,819	39,819	39,819
外周	離隔距離 (m)		5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
	延焼抵抗時間（分）	壁	30	30	30	30	30	30	30	30
		窓	0	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備		あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	SP 設備		あり	あり	あり	なし	あり	あり	あり	あり
躯体	被覆厚さ (mm)	柱	25	25	25	25	25	25	25	65
		梁	25	25	25	25	25	25	25	60
他	消火訓練		なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

4.3.2 計算結果

事務所 C に関する計算結果を表 4.7 および図 4.18 に示す。本手法では、出火防止性能 F_1 と消火活動支援性能 F_6 を評価できるようになっていないことから、残る 5 つの F 値の計算結果を示してある。

表 4.7 事務所 C に関する計算結果

F 値	被害指標	比較条件						
		1:消火訓練の実施	2:内装材料変更	3:SP 設備設置	4:外窓強化	5:内部壁床強化	6:内部扉強化	7:被覆厚さ変更
出火防止性能 F_1	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F_2	火災成長確率	1.092	1.206	0.699	0.988	0.999	1.009	1.011
倒壊防止性能 F_3	崩壊部分面積	3.343	1.471	0.179	1.022	1.030	1.015	1.270
延焼防止性能 F_4	延焼確率	3.357	1.477	0.177	1.020	1.028	1.014	1.030
避難安全性能 F_5	避難不能者数	1.184	1.103	0.572	0.998	0.997	1.009	1.022
消防活動支援性能 F_6	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F_7	改修工事費	5.114	1.107	0.500	1.054	1.040	1.012	1.011

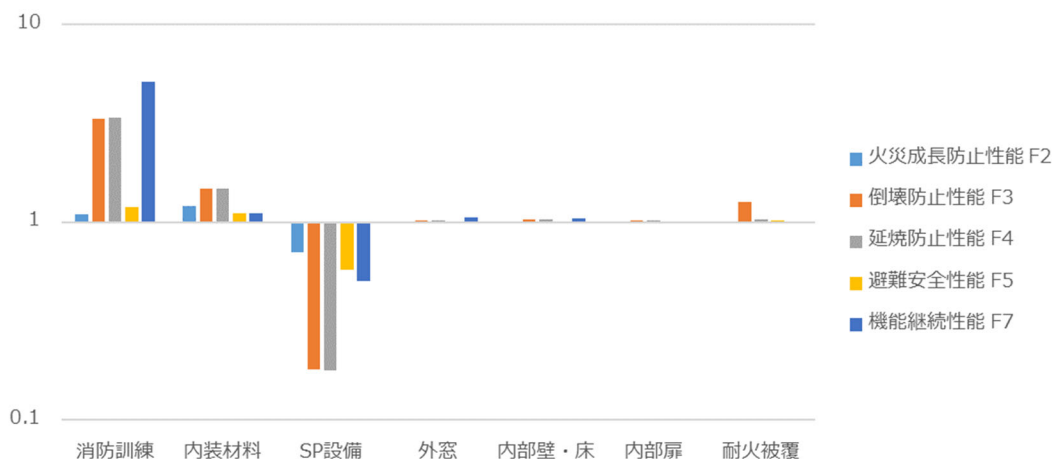


図 4.18 事務所 C に関する計算結果

- 条件1：消火訓練の実施は、全ての個別性能の向上につながる結果が得られた。F 値の上昇の仕方は、事務所 B の場合と類似しており、火災成長防止性能 F_2 および避難安全性能 F_5 の上昇が比較的小さかった。事務所 B と事務所 C は、建築物の規模（延床面積は、事務所 B が $31,756\text{m}^2$ 、事務所 C が $31,251\text{m}^2$ ）、および区画の規模（区画の最大床面積は、事務所 B で約 $2,700\text{m}^2$ 、事務所 C で約 $2,500\text{m}^2$ ）が似通っていることが、こうした結果と関係している可能性がある。
- 条件2：内装材料を不燃化した結果、全ての個別性能で性能向上が見られた。ただし、避難安全性能 F_5 および機能維持性能 F_7 に対する効果は他に比べて小さかった。特に、避難安全性能 F_5 に関する結果は、事務所 B と異なっていた。事務所 B と事務所 C では、建築物の延床面積が同程度である一方で、階数は事務所 B の方が高いことなどといった在館者の避難条件の差異が、避難安全性能 F_5 に関する結果に影響を及ぼしている可能性がある。
- 条件3：事務所 C でも、事務所 A および事務所 B の場合と同様、基準条件において既にスプリンクラー設備が設置されているものとしていたため、条件 3 ではこれを外した場合の効果を検証している。全ての個別性能で F 値の低下（この場合は性能の向上）が見られたが、その程度は、延焼防止性能 F_4 、倒壊防止性能 F_3 、機能維持性能 F_7 、避難安全性能 F_5 、火災成長防止性能 F_2 の順に大きかった。
- 条件4：外窓の強化については、延焼防止性能 F_4 を含め、いずれの個別性能の向上にもつながらなかった。延焼防止性能 F_4 の向上につながらなかった理由は、事務所 A および事務所 B の場合と同様、本手法において、延焼防止性能の中でも加害防止性能に着目をした評価を行っているためである。
- 条件5：内部構造のうち、壁および床の強化については、事務所 A の場合とは異なり、いずれの個別性能の向上にもつながらなかった。この理由は、事務所 A に比べて事

務所 C に規模の大きな区画が多く（区画の最大床面積は、事務所 A で約 1,000m²，事務所 CB で約 2,500m²），火災となった場合の継続時間が長くなるため，壁および床の延焼抵抗時間を 108 分とする程度では，十分な性能向上につながらなかったためと考えられる．

条件6： 内部構造のうち，扉の強化は，いずれの個別性能の F 値の向上にも寄与しなかった．この結果は，事務所 A の場合と同様であった．

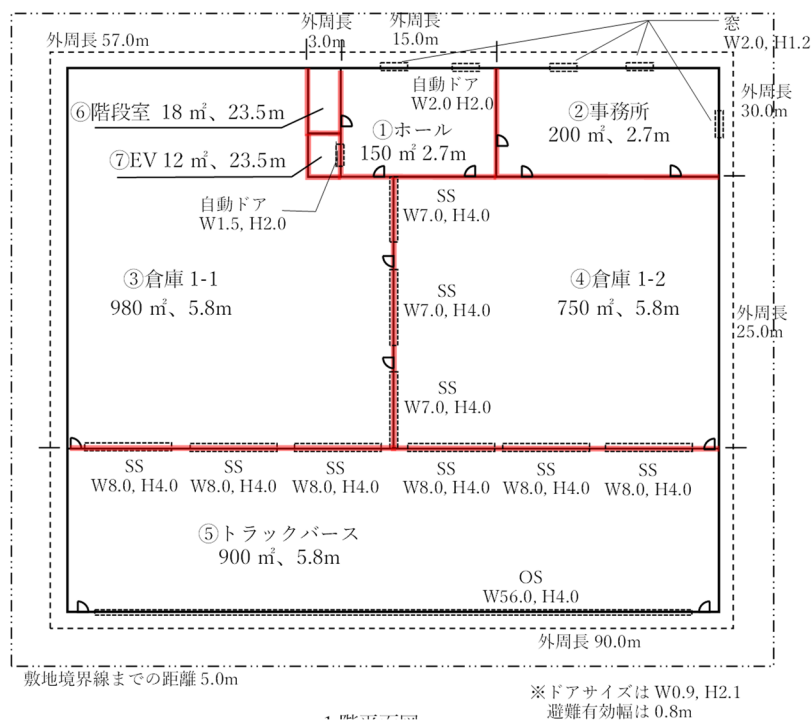
条件7： 柱および梁の耐火被覆の厚みの変更により，倒壊防止性能 F₃が向上した．上昇の程度は事務所 A の場合ほどではなかったものの，ほとんど変化が見られなかった事務所 B の場合とは対照的であった．この理由は条件 5 の場合と同様であり，建築物内の区画の規模が，事務所 B，事務所 C，事務所 A の順で大きく，火災となった場合の継続時間が長くなるため，事務所 C については，事務所 A と事務所 B の中間的な結果が得られたものと考えられる．

4.4 物流倉庫 A-1, A-2

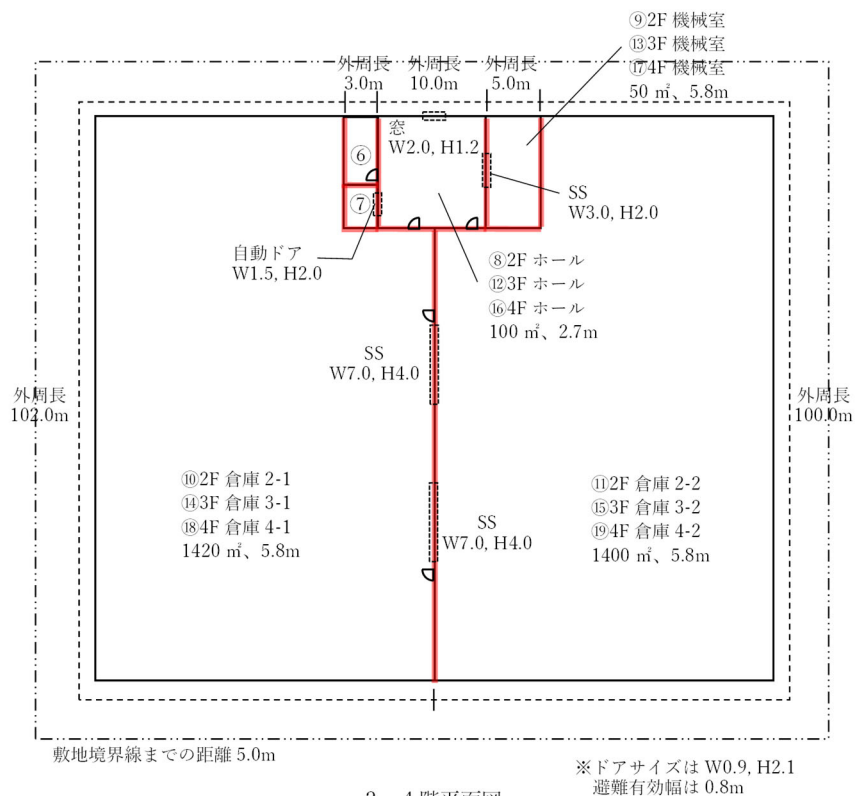
4.4.1 計算条件

各階平面図を図 4.19 に示す．ここでは，4 階建ての場合を A-1（延床面積 11,910m²，区画数 19），3 階建ての場合を A-2（延床面積 8,940m²，区画数 15）としてある．それぞれの計算条件一覧を，表 4.8 および表 4.9 に示す．また，計算上設定した各室の接続状況を図 4.20 に示す．

建築物は長方形状で，同じく長方形状の敷地に建っている．隣地境界線から建築物の各部分までの距離は 5m である．建築物の主たる部分の用途は倉庫だが，1 階には事務室とトラックバースを設けてある．この検討モデルでは，各室が単独で防火区画を形成することとしている．堅穴は，階段室およびエレベーターシャフトの各 1 か所であり，計算上，配管スペースの影響は無視している．排煙設備およびスプリンクラー設備は全館にわたって未設置である．主要構造部（柱・梁）の代表断面は各階・各区画とも共通とし，柱は□300-300-9，梁は H350-175-7-11 である．また階高さは全階とも 6m（柱長さに反映），構造スパンは X 方向・Y 方向とも 10m（梁長さに反映）としている．



1 階



2～4 階

図 4.19 物流倉庫 A-1, A-2 : 平面図

表 4.8 物流倉庫 A-1：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件							
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP 設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更	8: 離隔距離
内部構造	天井		普通コンクリート							
	壁		気泡コンクリート							
	床		普通コンクリート							
	延焼抵抗時間 (分)	壁	75	75	75	75	75	108	75	75
		扉	60	60	60	60	60	60	75	60
		床	75	75	75	75	75	108	75	75
内装	総発熱量 (MJ)		63,136	63,136	46,316	63,136	63,136	63,136	63,136	63,136
	総表面積 (m ²)		5,972	5,972	3,870	5,972	5,972	5,972	5,972	5,972
外周	離隔距離 (m)		5	5	5	5	5	5	5	3
	延焼抵抗時間 (分)	壁	30	30	30	30	30	30	30	30
		窓	0	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	SP 設備		なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし
躯体	被覆厚さ (mm)	柱	25	25	25	25	25	25	50	25
		梁	25	25	25	25	25	25	50	25
他	消火訓練		なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

表 4.9 物流倉庫 A-2：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件							
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP 設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更	8: 離隔距離
内部構造	天井		普通コンクリート							
	壁		気泡コンクリート							
	床		普通コンクリート							
	延焼抵抗時間 (分)	壁	75	75	75	75	75	108	75	75
		扉	60	60	60	60	60	60	75	60
		床	75	75	75	75	75	108	75	75
内装	総発熱量 (MJ)		49,665	49,665	36,832	49,665	49,665	49,665	49,665	63,136
	総表面積 (m ²)		4,588	4,588	2,984	4,588	4,588	4,588	4,588	5,972
外周	離隔距離 (m)		5	5	5	5	5	5	5	3
	延焼抵抗時間 (分)	壁	30	30	30	30	30	30	30	30
		窓	0	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	SP 設備		なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし
躯体	被覆厚さ (mm)	柱	25	25	25	25	25	25	50	25
		梁	25	25	25	25	25	25	50	25
他	消火訓練		なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

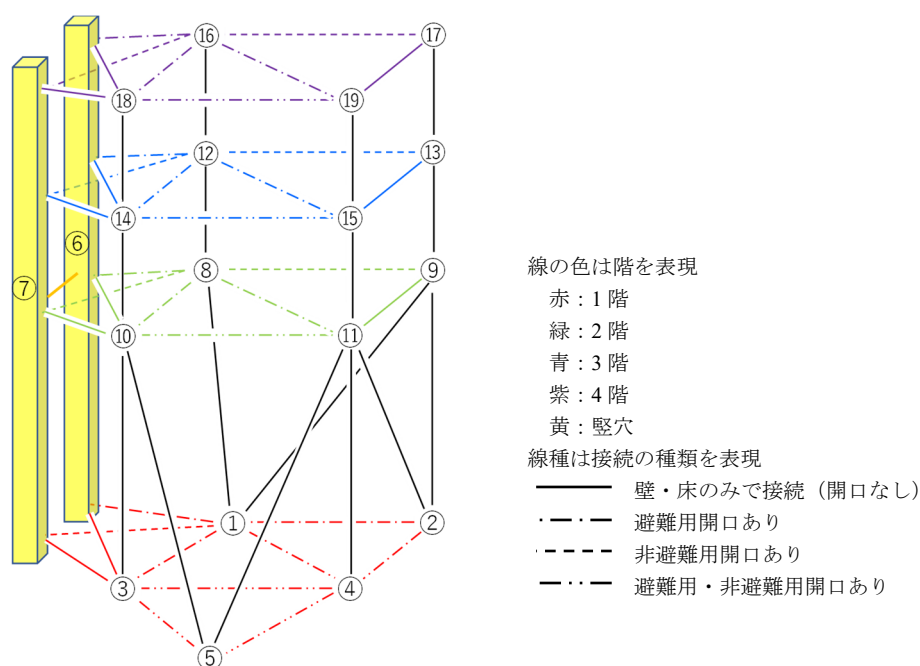


図 4.20 物流倉庫 A-1, A-2：ネットワーク図（数字は区画番号を表す）

物流倉庫 A-1, A-2 で検討した比較条件は、表 4.8 及び 4.9 に示す 8 条件であり、各条件の着眼点を整理すると以下の通りとなる。

- 条件 1：基準条件において実施されていなかった在館者の消火訓練が実施された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 2：居室の天井および壁に使用されていた準不燃材料が不燃材料に変更された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 3：基準条件において設置していないスプリンクラー設備（SP 設備）が設置された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 4：延焼のおそれのある範囲に含まれなかったため、0 分となっていた外壁開口部の窓の延焼抵抗時間を 20 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件 5：建築物内部の壁および床の延焼抵抗時間を 75 分から 108 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件 6：建築物内部の扉の延焼抵抗時間を 60 分から 75 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件 7：鉄骨柱および梁を被覆する吹き付けロックウールの厚みを 25 mm から 50 mm に変更された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 8：隣地境界までの離隔距離を 3m とし、外壁開口の窓の延焼抵抗時間は基準条件と同じ 0 分とした場合の性能の変化を調べている。

4.4.2 計算結果

物流倉庫 A-1 に関する計算結果を表 4.10、4.11 および図 4.21 に、物流倉庫 A-2 に関する計算結果を表 4.12、4.13 および図 4.22 示す。本手法では、出火防止性能 F_1 と消火活動支援性能 F_6 を評価できるようになっていないことから、残る 5 つの F 値の計算結果を示してあ

表 4.10 物流倉庫 A-1 に関する計算結果（被害量）

被害量	被害指標	0: 基準条件	比較条件							
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更	8: 隣地境界距離
出火防止性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能	火災成長確率	0.081	0.030	0.059	0.025	0.082	0.078	0.083	0.080	0.080
倒壊防止性能	崩壊部分面積	0.205	0.054	0.156	0.043	0.202	0.196	0.207	0.195	0.200
延焼防止性能	延焼確率	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
避難安全性能	避難不能者数	0.071	0.066	0.050	0.066	0.069	0.071	0.070	0.069	0.070
消防活動支援性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能	改修工事費	0.031	0.006	0.029	0.020	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031

表 4.11 物流倉庫 A-1 に関する計算結果（F 値）

F 値	被害指標	比較条件							
		1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更	8: 隣地境界距離
出火防止性能 F_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F_2	火災成長確率	2.721	1.373	3.194	0.986	1.035	0.982	1.015	1.010
倒壊防止性能 F_3	崩壊部分面積	3.795	1.314	4.773	1.016	1.048	0.994	1.051	1.027
延焼防止性能 F_4	延焼確率	2.995	1.317	3.530	1.010	1.047	0.992	1.022	1.015
避難安全性能 F_5	避難不能者数	1.074	1.427	1.084	1.035	1.007	1.010	1.032	1.015
消防活動支援性能 F_6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F_7	改修工事費	5.404	1.071	1.590	1.011	1.015	0.996	1.007	1.009

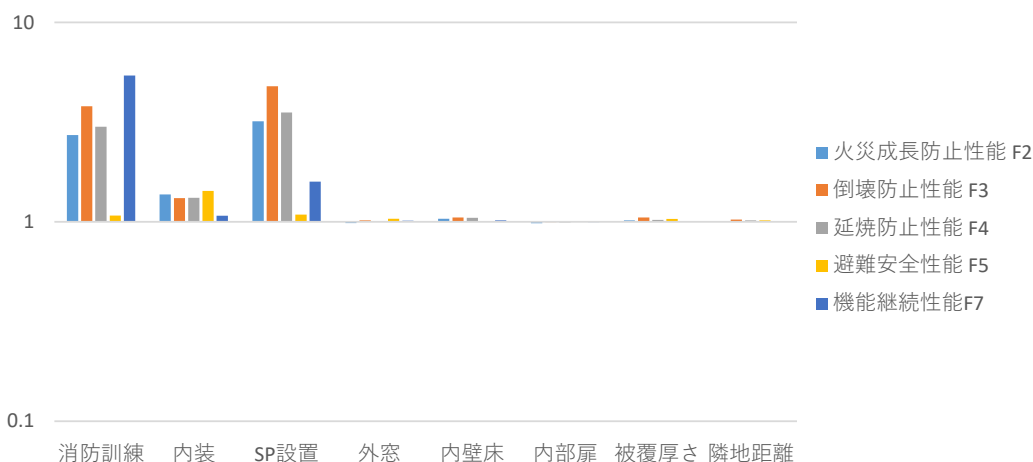


図 4.21 物流倉庫 A-1 に関する計算結果

表 4.12 物流倉庫 A-2 に関する計算結果（被害量）

被害量	被害指標	0: 基準条件	比較条件							
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更	8: 隣地境界距離
出火防止性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能	火災成長確率	0.082	0.026	0.060	0.022	0.080	0.082	0.081	0.081	0.082
倒壊防止性能	崩壊部分面積	0.219	0.055	0.164	0.046	0.215	0.219	0.217	0.211	0.220
延焼防止性能	延焼確率	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
避難安全性能	避難不能者数	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
消防活動支援性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能	改修工事費	0.030	0.005	0.028	0.018	0.029	0.030	0.030	0.030	0.030

表 4.13 物流倉庫 A-2 に関する計算結果（F 値）

F 値	被害指標	比較条件							
		1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更	8: 隣地境界距離
出火防止性能 F_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F_2	火災成長確率	3.162	1.361	3.721	1.019	0.997	1.003	1.005	0.994
倒壊防止性能 F_3	崩壊部分面積	3.970	1.335	4.766	1.019	0.999	1.008	1.037	0.994
延焼防止性能 F_4	延焼確率	4.029	1.349	4.836	1.023	1.001	1.011	1.010	0.985
避難安全性能 F_5	避難不能者数	∞	∞	∞	2.004	1.995	∞	∞	∞
消防活動支援性能 F_6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F_7	改修工事費	5.916	1.078	1.639	1.016	1.005	1.003	1.004	0.999

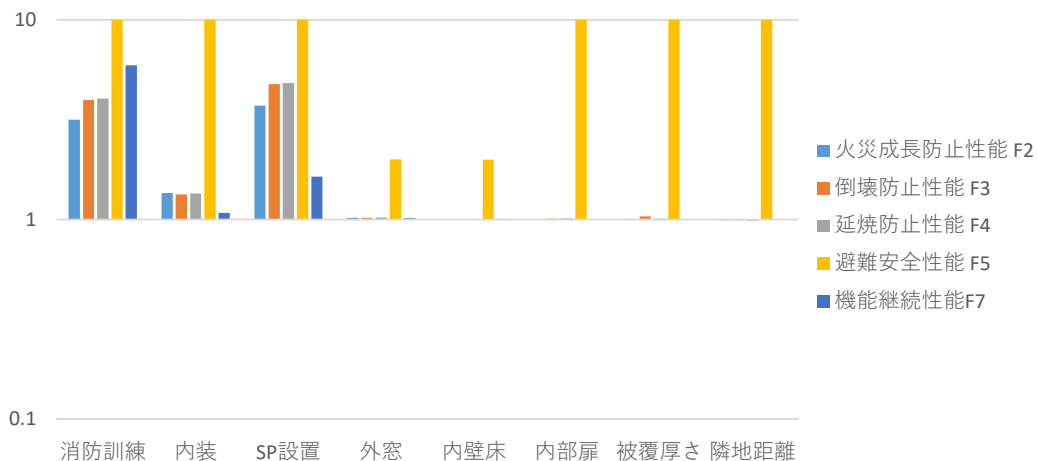


図 4.22 物流倉庫 A-2 に関する計算結果

る。また、基準条件に対する相対値である F 値だけでは判断が難しいと思われる項目もあったため、被害量の計算結果も示してある。

図 4.21, 4.22 をみると、物流倉庫 A-1, A-2 のいずれにおいても、条件 1 から条件 3 の対策の効果が得られた。一方で、条件 4 から条件 8 については、性能に目立った変化は見られなかった。ただし、物流倉庫 A-2 については、避難安全性能 F_5 の値が無限大をとる場合が

あった。これは、被害量である避難不能者数の期待値がゼロとなったためである。もともと物流倉庫の在館者数は少なく、避難安全上の問題が顕在化することは少ない。ただし、期待値ゼロという計算結果が実態を適切に再現しているとは考えにくく、モンテカルロシミュレーションの試行回数の不足などの要因によるものと考えられる。

性能項目ごとに見ると、避難安全性能を除く4つの項目で「消火訓練の実施（条件1）」と「SP設備設置（条件3）」の効果が高い。「内装材料の変更（条件2）」はいずれの性能項目についても効果があったが、その程度は小さかった。これは、準不燃材料から不燃材料への変更のため、性能改善の効果が小さかったものと考えられる。

「外窓強化（条件4）」、「内部壁床強化（条件5）」、「内部扉強化（条件6）」、「被覆厚さ変更（条件7）」については、倒壊防止性能 F_3 あるいは延焼防止性能 F_4 の改善に効果が期待されたが、ほとんど変化が表れなかった。これは、物流倉庫の収納可燃物量の多さと外壁に設けられた開口部の小ささが関係しているものと考えられる。すなわち、こうした物流倉庫の特徴により、いったん盛期火災が発生してしまえば、内部の高温状態が長期間にわたって継続するため、今回の検討で設定したような対策では十分な効果が得られなかった可能性がある。その詳細を明らかにするには、表4.10および表4.12に示した被害量が、他の用途の建築物に比してどの程度の位置付けにあるのかを明らかにする必要がある。

「離隔距離の確保（条件8）」は、隣棟建物との関係を検討することを目的としているが、延焼防止性能 F_4 にはほとんど変化が見られなかった。この原因として、物流倉庫用途の建築物の特徴である外壁開口部の少なさを挙げることができる。また、この物流倉庫では、1階のトラックバース部分は外部に対して大きな開口を持つものの、比較的可燃物の少ない用途（駐車場に相当）としていることも、結果に変化が生じなかった原因と考えられる。

4.5 物流倉庫 B-1, B-2

4.5.1 計算条件

平面図を図4.23に示す。各階の平面形状は同一で、建築物の各部分から隣地境界線までの距離は5mだが、4階建てとした場合をB-1（延床面積30,750 m^2 、区画数45）、3階建てとした場合をB-2（延床面積23,100 m^2 、区画数35）としている。それぞれの計算条件一覧を、表4.14および表4.15に示す。また、計算上設定した各室の接続状況を図4.24に示す。

建築物の主たる部分の用途は倉庫であるが、各階に事務室を設置してある。この検討モデルでは各室が単独で防火区画を形成することとしている。堅穴は2系統の階段室、および3系統のエレベーターシャフト（中央のエレベーターは荷物搬送用）であるが、計算上、配管スペースの影響は無視している。排煙設備およびスプリンクラー設備は全館にわたって未設置である。主要構造部（柱・梁）の代表断面は各階・各区画とも共通とし、柱は□300-300-9、梁はH350-175-7-11である。また階高さは全階とも6m（柱長さに反映）、構造スパンは

X 方向・Y 方向とも 10m（梁長さに反映）としている。

物流倉庫 B-1・B-2 で検討した比較条件は、表 4.14 及び 4.15 に示す 7 条件であり、各条件の着眼点を整理すると以下の通りとなる。なお、物流倉庫 A-1、A-2 で検討とした隣地境界

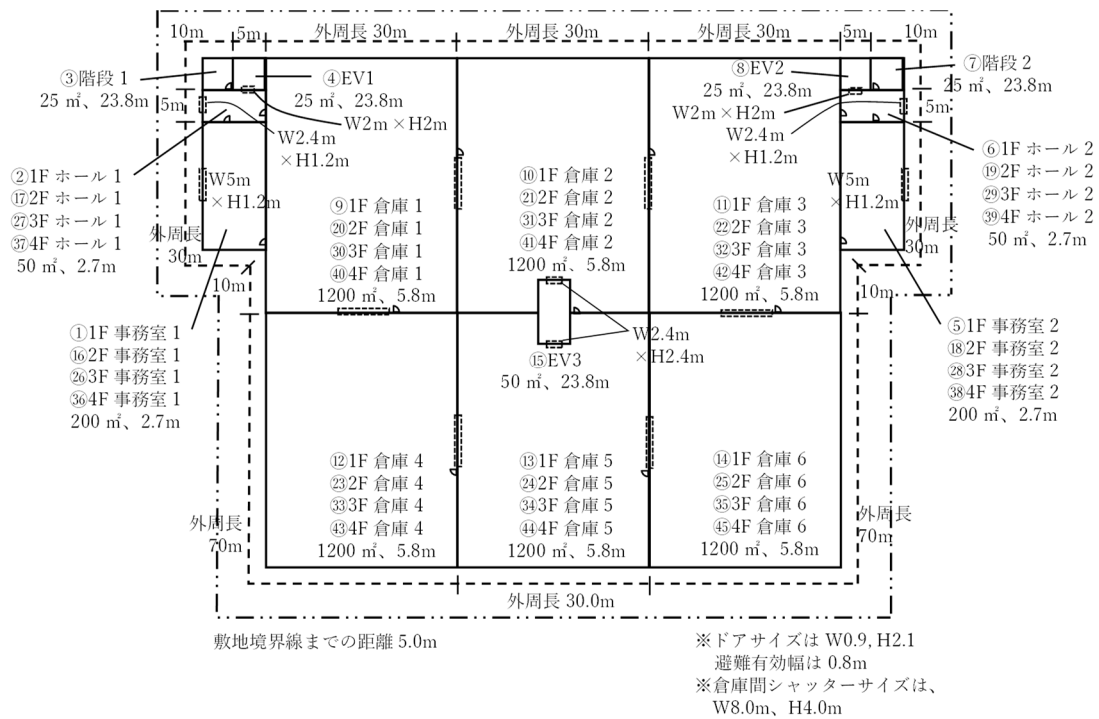


図 4.23 物流倉庫 B-1, B-2：平面図（各室は全て単独の防火区画）

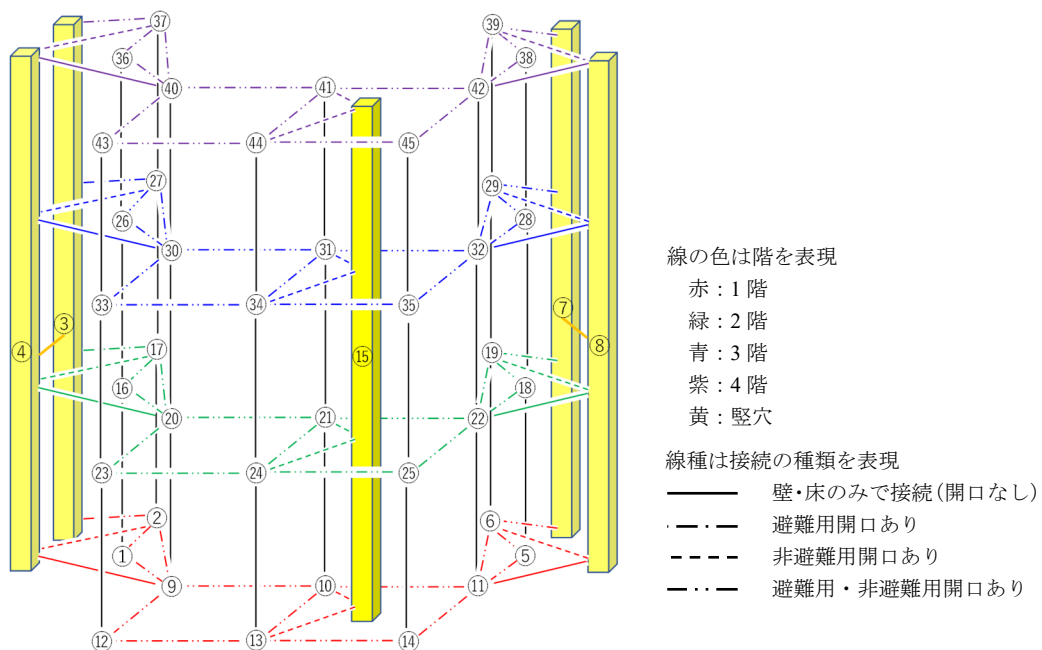


図 4.24 物流倉庫 B-1, B-2：ネットワーク図（数字は区画番号を表す）

表 4.14 物流倉庫 B-1：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件						
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP 設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更
内部構造	天井	普通コンクリート							
	壁	気泡コンクリート							
	床	普通コンクリート							
	延焼抵抗時間(分)	壁	75	75	75	75	75	108	75
		扉	60	60	60	60	60	60	75
		床	75	75	75	75	75	108	75
内装	総発熱量(MJ)	124,629	124,629	81,124	124,629	124,629	124,629	124,629	124,629
	総表面積(m ²)	14,401	14,401	8,963	14,401	14,401	14,401	14,401	14,401
外周	離隔距離(m)	5	5	5	5	5	5	5	5
	延焼抵抗時間(分)	壁	30	30	30	30	30	30	30
		窓	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	SP 設備	なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし
躯体	被覆厚さ(mm)	柱	25	25	25	25	25	25	50
		梁	25	25	25	25	25	25	50
他	消火訓練	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

表 4.15 物流倉庫 B-2：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件						
			1: 消火訓練の実施	2: 内装材料変更	3: SP 設備設置	4: 外窓強化	5: 内部壁床強化	6: 内部扉強化	7: 被覆厚さ変更
内部構造	天井	普通コンクリート							
	壁	気泡コンクリート							
	床	普通コンクリート							
	延焼抵抗時間(分)	壁	75	75	75	75	75	108	75
		扉	60	60	60	60	60	60	75
		床	75	75	75	75	75	108	75
内装	総発熱量(MJ)	97,848	97,848	64,674	97,848	97,848	97,848	97,848	97,848
	総表面積(m ²)	11,054	11,054	6,907	11,054	11,054	11,054	11,054	11,054
外周	離隔距離(m)	5	5	5	5	5	5	5	5
	延焼抵抗時間(分)	壁	30	30	30	30	30	30	30
		窓	0	0	0	20	0	0	0
設備	排煙設備	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	SP 設備	なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし
躯体	被覆厚さ(mm)	柱	25	25	25	25	25	25	50
		梁	25	25	25	25	25	25	50
他	消火訓練	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

までの離隔距離については、影響が確認されなかったことから、物流倉庫 B-1、B-2 では設定しなかった。

条件 1：基準条件において実施されていなかった在館者の消火訓練が実施された場合の性能の変化を調べている。

条件 2：居室の天井および壁に使用されていた準不燃材料が不燃材料に変更された場合の性能の変化を調べている。

条件 3：基準条件において設置していないスプリンクラー設備（SP 設備）が設置された場合の性能の変化を調べている。

条件 4：延焼のおそれのある範囲に含まれなかったため、0 分となっていた外壁開口部の窓の延焼抵抗時間を 20 分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件 5：建築物内部の壁および床の延焼抵抗時間を 75 分から 108 分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件 6：建築物内部の扉の延焼抵抗時間を 60 分から 75 分に延長した場合の性能の変化を調べている。

条件 7：鉄骨柱および梁を被覆する吹き付けロックウールの厚みを 25 mm から 50 mm に変更された場合の性能の変化を調べている。

4.5.2 計算結果

物流倉庫 B-1 に関する計算結果を表 4.16、4.17 および図 4.25 に、物流倉庫 B-2 に関する計算結果を表 4.18、4.19 および図 4.26 に、それぞれ示す。本手法では、出火防止性能 F_1 と消火活動支援性能 F_6 を評価できるようになっていないことから、残る 5 つの F 値の計算結果を示してある。また、基準条件に対する相対値である F 値だけでは判断が難しいと思われる項目もあったため、被害量の計算結果も示してある。

図 4.25、4.26 をみると、物流倉庫 A の場合と同様、条件 1 から条件 3 の対策の効果が得られた。また一方で、条件 4 から条件 7 の効果は見られなかった。

性能項目ごとに見ると、避難安全性能を除く 4 つの項目で「消火訓練の実施（条件 1）」と「SP 設備設置（条件 3）」の効果が高かった。「内装材料の変更（条件 2）」はいずれの性能項目対しても向上効果があったが、物流倉庫 A の場合と同様の理由から、その効果は限定的であった。避難安全性能 F_5 については、物流倉庫 A に比べて物流倉庫 B の規模が大きく、在館者数が多いためか、避難不能者数の期待値がゼロとなることはなかった。ただし、条件 1 から条件 3 の対策が講じられることで、各性能項目の性能向上が見られる中で、避難安全性能 F_5 の向上効果が他に比べて小さい理由は、やはり物流倉庫用途の建築物における在館者数の少なさに起因してる可能性がある。

「外窓強化（条件 4）」、「内部壁床強化（条件 5）」、「内部扉強化（条件 6）」、「被覆厚さ変更（条件 7）」については、その効果をほとんど確認できなかった。これは、物流倉庫 A の場合と同様、物流倉庫の収納可燃物量の多さと外壁に設けられた開口部の小ささが関係しているものと考えられる。物流倉庫 B は物流倉庫 A に比べてさらに収納可燃物量が多く、火災継続時間も長くなるため、物流倉庫 A で効果が表れなかった条件では、物流倉庫 B でもやはり効果が表れなかった。

表 4.16 物流倉庫 B-1 に関する計算結果（被害量）

被害量	被害指標	0：基準条件	比較条件						
			1：消火訓練の実施	2：内装材料変更	3：SP設備設置	4：外窓強化	5：内部壁床強化	6：内部扉強化	7：被覆厚さ変更
出火防止性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能	火災成長確率	0.089	0.066	0.068	0.065	0.086	0.090	0.08688	0.08793
倒壊防止性能	崩壊部分面積	0.070	0.025	0.051	0.023	0.067	0.070	0.06725	0.06878
延焼防止性能	延焼確率	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00005	0.00005
避難安全性能	避難不能者数	0.020	0.015	0.017	0.014	0.020	0.021	0.02001	0.02025
消防活動支援性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能	改修工事費	0.015	0.003	0.013	0.009	0.015	0.015	0.01464	0.01474

表 4.17 物流倉庫 B-1 に関する計算結果（F 値）

F 値	被害指標	比較条件						
		1：消火訓練の実施	2：内装材料変更	3：SP設備設置	4：外窓強化	5：内部壁床強化	6：内部扉強化	7：被覆厚さ変更
出火防止性能 F ₁	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F ₂	火災成長確率	1.350	1.312	1.365	1.032	0.994	1.027	1.015
倒壊防止性能 F ₃	崩壊部分面積	2.837	1.366	3.198	1.043	0.997	1.041	1.018
延焼防止性能 F ₄	延焼確率	2.847	1.368	3.211	1.043	0.996	1.041	1.016
避難安全性能 F ₅	避難不能者数	1.378	1.183	1.435	1.011	0.989	1.018	1.006
消防活動支援性能 F ₆	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F ₇	改修工事費	5.287	1.117	1.571	1.020	1.008	1.019	1.012

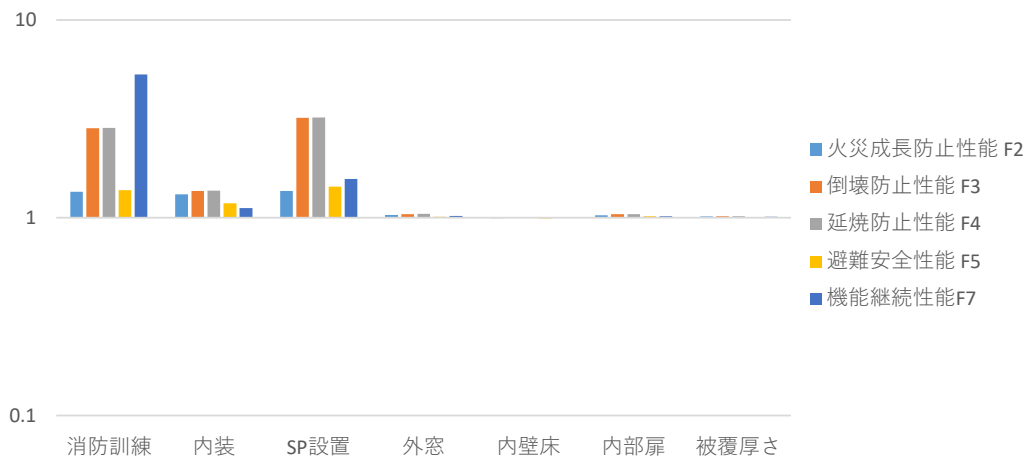


図 4.25 物流倉庫 B-1 に関する計算結果

表 4.18 物流倉庫 B-2 に関する計算結果（被害量）

被害量	被害指標	0：基準条件	比較条件						
			1：消火訓練の実施	2：内装材料変更	3：SP設備設置	4：外窓強化	5：内部壁床強化	6：内部扉強化	7：被覆厚さ変更
出火防止性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能	火災成長確率	0.084	0.060	0.064	0.055	0.088	0.088	0.088	0.087
倒壊防止性能	崩壊部分面積	0.087	0.033	0.066	0.027	0.092	0.092	0.092	0.090
延焼防止性能	延焼確率	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
避難安全性能	避難不能者数	0.020	0.015	0.017	0.014	0.020	0.021	0.021	0.020
消防活動支援性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能	改修工事費	0.019	0.004	0.017	0.012	0.019	0.019	0.019	0.019

表 4.19 物流倉庫 B-2 に関する計算結果（F 値）

F 値	被害指標	比較条件						
		1：消火訓練の実施	2：内装材料変更	3：SP設備設置	4：外窓強化	5：内部壁床強化	6：内部扉強化	7：被覆厚さ変更
出火防止性能 F ₁	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F ₂	火災成長確率	1.397	1.304	1.519	0.952	0.957	0.953	0.962
倒壊防止性能 F ₃	崩壊部分面積	2.625	1.321	3.202	0.947	0.9475	0.947	0.966
延焼防止性能 F ₄	延焼確率	2.634	1.324	3.214	0.947	0.9475	0.946	0.964
避難安全性能 F ₅	避難不能者数	1.353	1.170	1.421	0.987	0.974	0.973	0.988
消防活動支援性能 F ₆	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F ₇	改修工事費	5.124	1.092	1.558	0.979	0.988	0.978	0.985

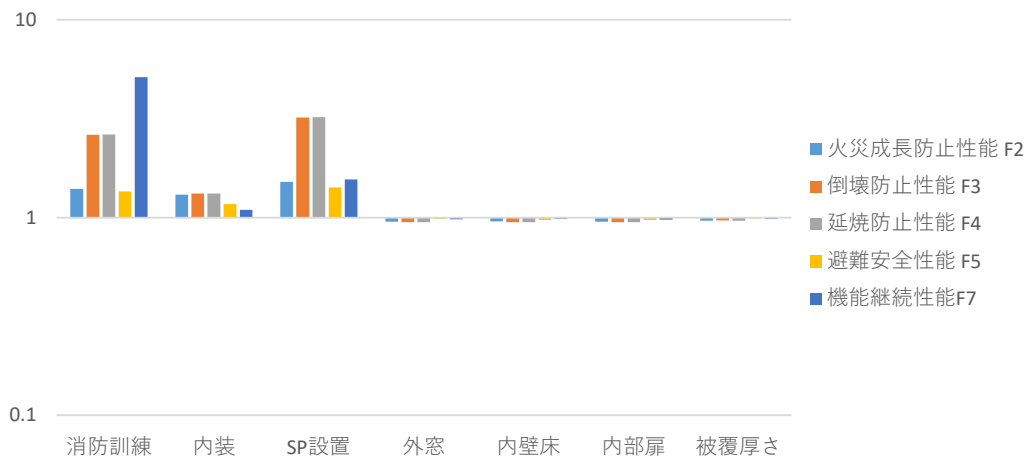


図 4.26 物流倉庫 B-2 に関する計算結果

4.6 物流倉庫 C

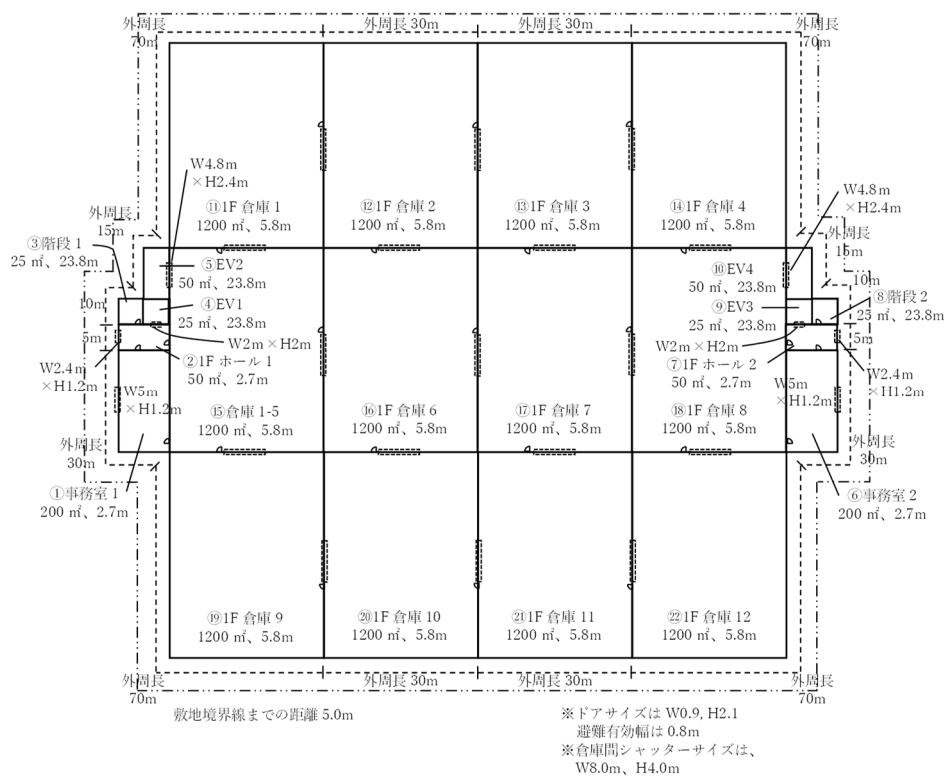
4.6.1 計算条件

平面図を図 4.27 に示す。建築物の延床面積は 44,100m² で、階数は 3 である。各階の平面形状は同一で、建築物の各部分から隣地境界線までの距離は 5m である。計算条件一覧を表 4.20 に示す。また、計算上設定した各室の接続状況を図 4.28 に示す。

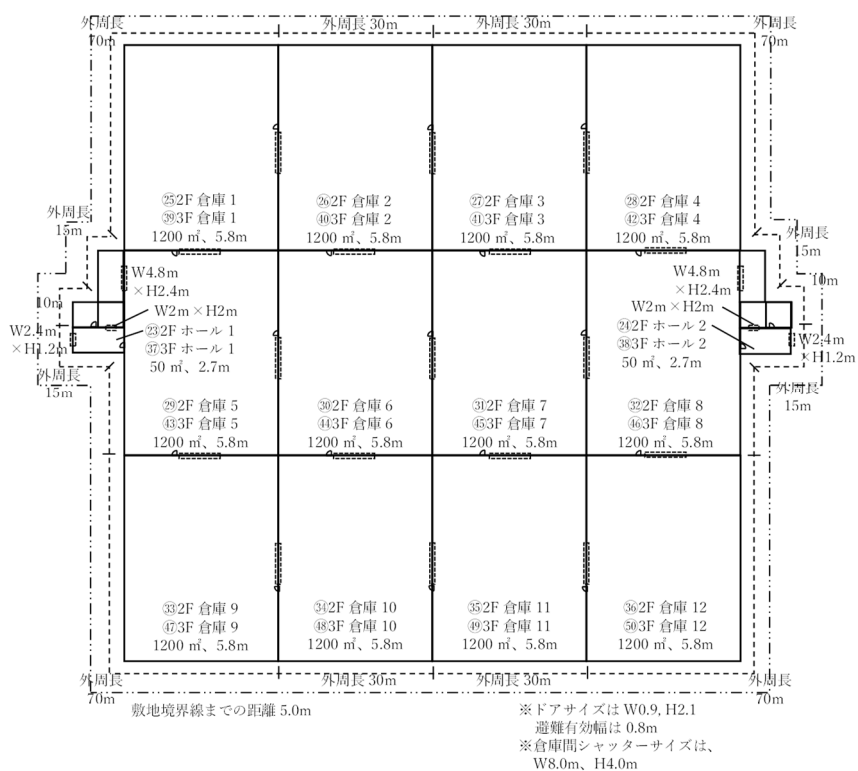
建築物の主たる部分の用途は倉庫であるが、1 階にのみ事務室を設置してある。この検討モデルでは各室が単独で防火区画を形成することとしている。竪穴となるのは 2 系統の階段室および 4 系統のエレベーターシャフト（うち 2 系統は荷物搬送用を想定）であるが、計算上、配管スペースの影響は無視している。排煙設備およびスプリンクラー設備は全館にわたって未設置である。各部の面積、天井高さ、開口条件は図面中に記載している。主要構造部（柱・梁）の代表断面は各階・各区画とも共通とし、柱は□300-300-9、梁は H350-175-7-11 である。また階高さは全階とも 6m（柱長さに反映）、構造スパンは X 方向・Y 方向とも 10m（梁長さに反映）としている。

物流倉庫 C で検討した比較条件は、表 4.20 に示す 7 条件であり、各条件の着眼点を整理すると以下の通りとなる。なお、物流倉庫 A-1、A-2 で検討とした隣地境界までの離隔距離については、影響が確認されなかったことから、物流倉庫 C では設定しなかった。

- 条件 1：基準条件において実施されていなかった在館者の消火訓練が実施された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 2：居室の天井および壁に使用されていた準不燃材料が不燃材料に変更された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 3：基準条件において設置していないスプリンクラー設備（SP 設備）が設置された場合の性能の変化を調べている。
- 条件 4：延焼のおそれのある範囲に含まれなかったため、0 分となっていた外壁開口部の窓の延焼抵抗時間を 20 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件 5：建築物内部の壁および床の延焼抵抗時間を 75 分から 108 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件 6：建築物内部の扉の延焼抵抗時間を 60 分から 75 分に延長した場合の性能の変化を調べている。
- 条件 7：鉄骨柱および梁を被覆する吹き付けロックウールの厚みを 25 mm から 50 mm に変更された場合の性能の変化を調べている。



1 階



2,3 階

図 4.27 物流倉庫 C 平面図（各室は全て単独の防火区画）

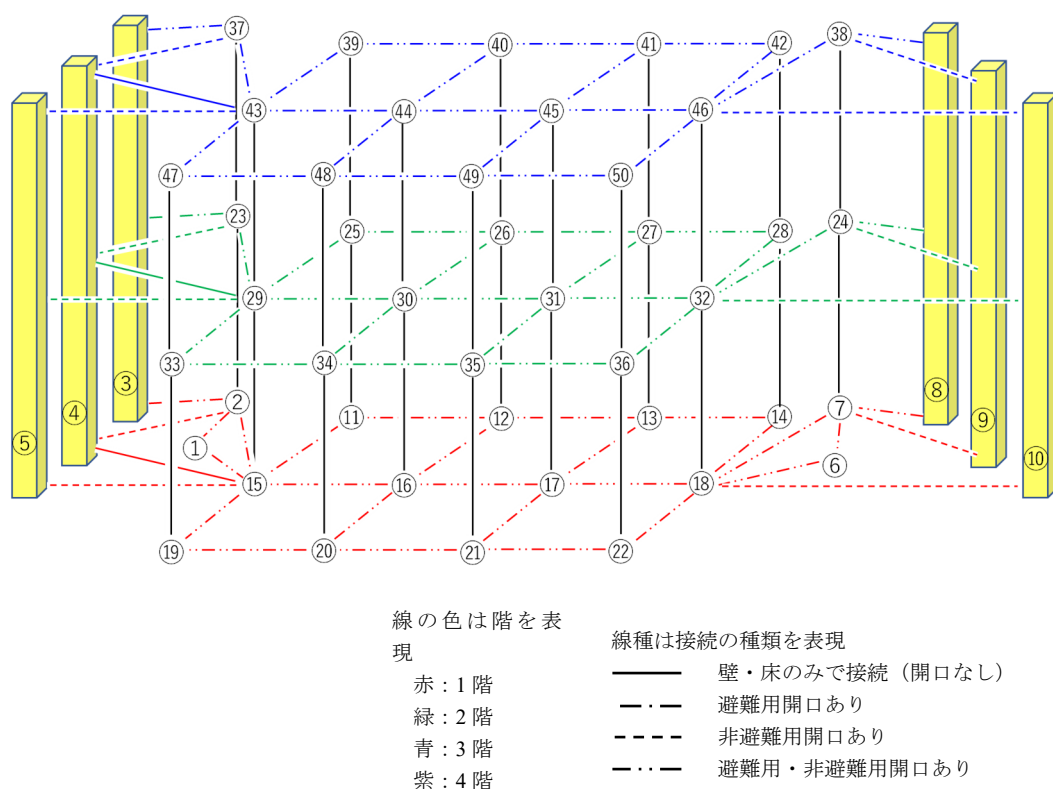


図 4.28 物流倉庫 C：ネットワーク図（数字は区画番号を表す）

表 4.20 物流倉庫 C：計算条件一覧

分類	項目	基準条件	比較条件						
			1:消火訓練の実施	2:内装材料変更	3:SP 設備設置	4:外窓強化	5:内部壁床強化	6:内部扉強化	7:被覆厚さ変更
内部構造	天井	普通コンクリート							
	壁	気泡コンクリート							
	床	普通コンクリート							
	延焼抵抗時間 (分)	壁	75	75	75	75	75	108	75
内装	延焼抵抗時間 (分)	扉	60	60	60	60	60	60	75
		床	75	75	75	75	75	108	75
外周	総発熱量 (MJ)	176,663	176,663	111,681	176,663	176,663	176,663	176,663	176,663
	総表面積 (m ²)	20,105	20,105	12,483	20,105	20,105	20,105	20,105	20,105
	離隔距離 (m)	5	5	5	5	5	5	5	5
設備	延焼抵抗時間 (分)	壁	30	30	30	30	30	30	30
		窓	0	0	0	0	20	0	0
躯体	排煙設備	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	SP 設備	なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし
他	被覆厚さ (mm)	柱	25	25	25	25	25	25	50
		梁	25	25	25	25	25	25	50
他	消火訓練	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし

4.6.2 計算結果

物流倉庫 C に関する計算結果を表 4.21、4.22 および図 4.29 に示す。本手法では、出火防止性能 F_1 と消火活動支援性能 F_6 を評価できるようになっていないことから、残る 5 つの F 値の計算結果を示してある。また、基準条件に対する相対値である F 値だけでは判断が難

表 4.21 物流倉庫 C に関する計算結果（被害量）

被害量	被害指標	0：基準条件	比較条件						
			1：消火訓練の実施	2：内装材料変更	3：SP 設備設置	4：外窓強化	5：内部壁床強化	6：内部扉強化	7：被覆厚さ変更
出火防止性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能	火災成長確率	0.090	0.070	0.071	0.067	0.088	0.092	0.087	0.095
倒壊防止性能	崩壊部分面積	0.073	0.019	0.053	0.015	0.069	0.074	0.069	0.079
延焼防止性能	延焼確率	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
避難安全性能	避難不能者数	0.354	0.290	0.264	0.290	0.348	0.356	0.354	0.358
消防活動支援性能	—	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能	改修工事費	0.015	0.002	0.013	0.009	0.014	0.015	0.014	0.015

表 4.22 物流倉庫 C に関する計算結果（F 値）

F 値	被害指標	比較条件						
		1：消火訓練の実施	2：内装材料変更	3：SP 設備設置	4：外窓強化	5：内部壁床強化	6：内部扉強化	7：被覆厚さ変更
出火防止性能 F_1	—	—	—	—	—	—	—	—
火災成長防止性能 F_2	火災成長確率	1.296	1.279	1.339	1.024	0.985	1.041	0.947
倒壊防止性能 F_3	崩壊部分面積	3.920	1.376	5.054	1.062	0.989	1.071	0.933
延焼防止性能 F_4	延焼確率	3.834	1.378	4.933	1.066	0.991	1.074	0.942
避難安全性能 F_5	避難不能者数	1.219	1.340	1.220	1.017	0.994	1.001	0.989
消防活動支援性能 F_6	—	—	—	—	—	—	—	—
機能継続性能 F_7	改修工事費	5.892	1.107	1.673	1.025	1.007	1.027	0.979

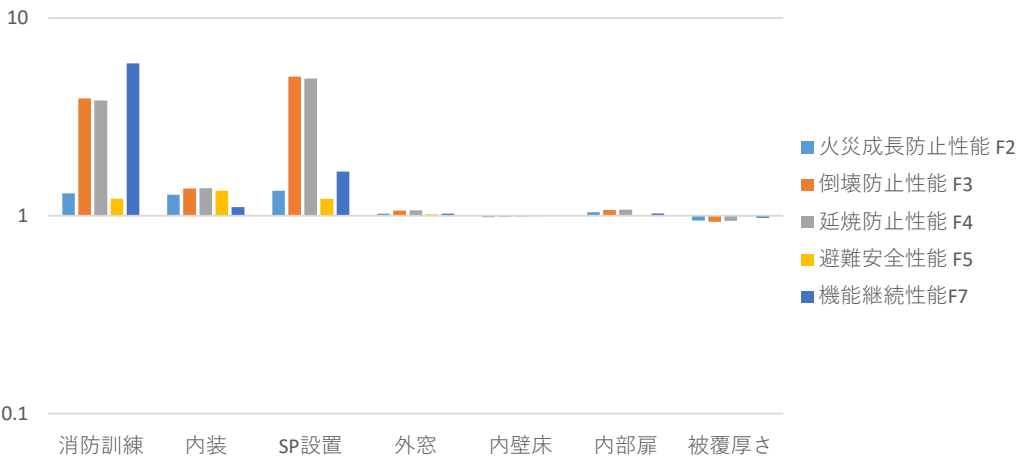
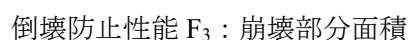


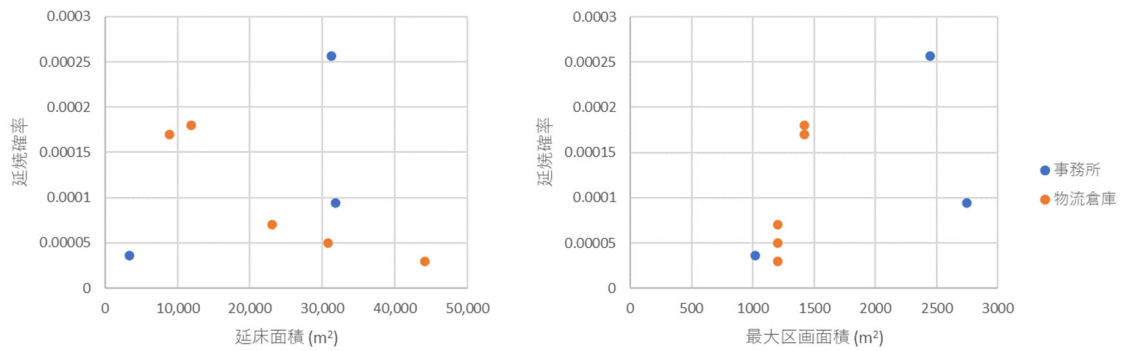
図 4.29 物流倉庫 C に関する計算結果

図 4.29 をみると、物流倉庫 A および物流倉庫 B の場合と同様、条件 1 から条件 3 の対策の効果が得られた。その一方で、条件 4 から条件 7 の効果は見られなかった。また、性能項目ごとの性能向上の特徴も、平面計画によって大きくは変わらなかった。物流倉庫建築物は、今回検討を行った 3 種類のモデルプランにあるように、区画構成が比較的単純であること、また収納可燃物量が圧倒的に多く、同じ建築物内の事務室などの他の用途の影響を受けにくいことなどが背景にあるものと考えられる。

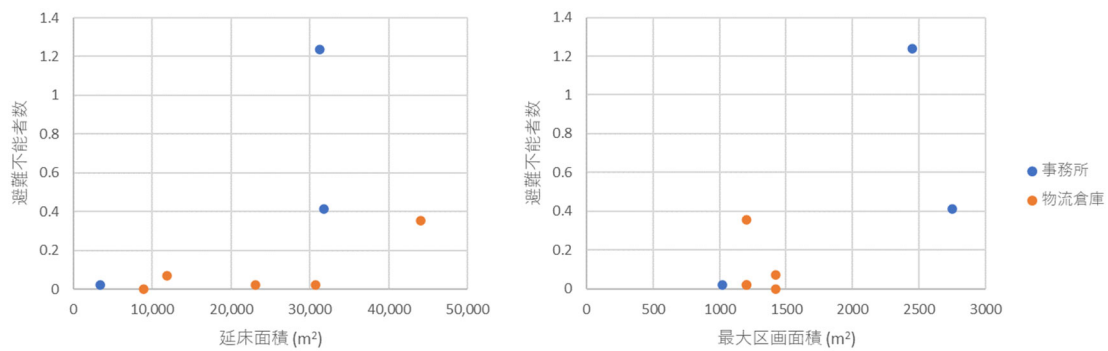
個別性能を表現する F 値は、同じ平面計画の基準的な建築物に対する相対的な性能を表すものであり、平面計画が異なる建築物同士を比較することが難しい。そこで、参考のため、本章で検討した異なる用途、規模の建築物について、F 値の計算の元になっている被害量を比較した結果を図 4.30 に示す。ただし、用途間の比較を行えるようにするため、横軸には延べ床面積および最大区画面積を採用した。また、比較に利用した計算条件は、いずれの用途についても対策が講じられる前の条件（事務所は条件 3、物流倉庫は基準条件）である。



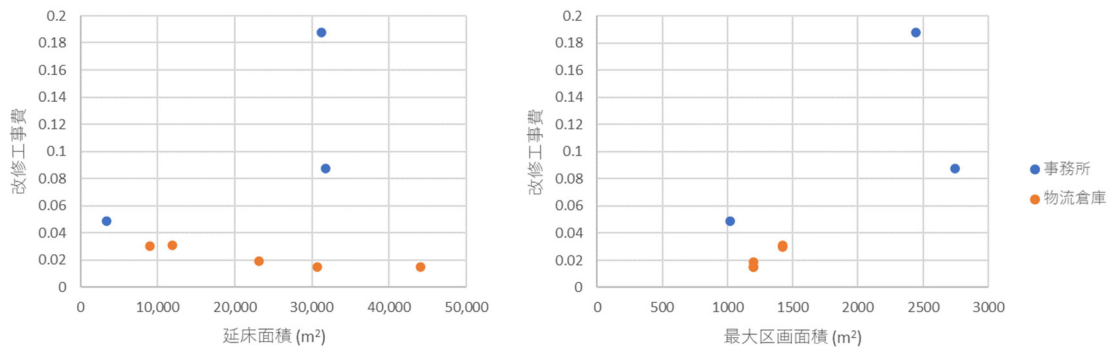
131



延焼防止性能 F₄: 延焼確率



避難安全性能 F₅: 避難不能者数



機能維持性能 F₇: 改修工事費

図 4.30 (承前) 被害量の計算結果の比較

まず、物流倉庫については、各被害量の延床面積に対する変化が一貫していた。すなわち、「火災成長確率」、「避難不能者数」は延床面積が大きいほど大きくなり、「崩壊部分面積」、「延焼確率」、および「改修工事費」は延床面積が大きいほど小さくなった。これは物流倉庫の平面計画が比較的単純であったことで、平面計画の差異が被害程度に及ぼす影響が表れにくくなり、建築物の規模に対する依存度が大きくなったためと考えられる。最大区画面積の場合には、延床面積の場合とはデータ点の分布の傾向が異なっており、最大区画面積が大きくなるほど、各個別性能を代表する被害量が一貫して大きくなる傾向が表れた。

一方、事務所では、延床面積または最大区画面積が大きくなるほど、被害量が大きくなる傾向が表れた。ただし、事務所 B と事務所 C については、延床面積と最大区画面積が同程度であるものの、データ点はいずれの被害量であっても隔たっており、ばらつきが大きかった。これは、同じ事務所であっても平面計画が大きく異なっていたため、延床面積や最大区画面積といった建築物の全体的な特徴を表す指標では、個別性能の差異を捉えることが難しいことを示している。

4.8 まとめ

本章では、2 章および 3 章に示した計算手続きを実装した防火性能評価プログラムを利用して、いくつかの事務所建築物および物流倉庫建築物を対象としたケーススタディを行った。この中で、消火訓練の実施（条件 1）、内装材料の変更（条件 2）、スプリンクラー設備の設置または解除（条件 3）、外窓の強化（条件 4）、内部壁・床の強化（条件 5）、内部扉の強化（条件 6）、鉄骨柱・梁の耐火被覆厚さの変更（条件 7）、敷地境界からの離隔距離の変更（条件 8）といった条件の変更が、建築物の個別性能（火災成長防止（F2）、倒壊防止（F3）、延焼防止（F4）、避難安全（F5）、機能維持（F7）の各性能）に及ぼす影響を調べた。各条件の性能向上効果は、各個別性能に対して一様ではなく、対象となる建築物の特徴に応じて変化した。ただし、本ケーススタディを通じていくつかの課題も明らかになっていることから、今後は以下のような点について検討を進める必要がある。

- ・ 倒壊防止性能（F2）については、本ケーススタディにおいて火災継続時間の比較的長い条件を中心に検討したため、内部壁・床の強化（条件 5）、内部扉の強化（条件 6）、鉄骨柱・梁の耐火被覆厚さの変更（条件 7）などの効果を十分に検証できなかった。より幅広い条件について検討を加えることで課題を明らかにする必要がある。
- ・ 延焼防止性能（F4）の評価においては、当該建築物が火災となった場合の隣接する建築物に対する延焼の抑止（加害防止性能）のみに着目しているため、一部条件において適切な評価を行えない場合があった。隣接する建築物が火災となった場合の当該建築物に対する延焼の抑止（受害防止性能）を考慮するなど、計算方法の修正が必要である。
- ・ 避難安全性能（F5）の評価においては、在館者数が少ない用途の建築物での評価を適切に行えなくなることがあった。これは被害量である避難不能者数の逆数から F 値を算出することに起因していることから、より安定的な評価を行うための計算手続きの見直しが必要である。
- ・ 個別性能の向上あるいは低下は、複数の防火上の設計仕様が関係している場合があり、出力された F 値から直ちにその原因を特定することは難しい。高い防火性能を備えた建築物を普及させるという立場からは、より効果的に防火性能を向上させることができる設計の代替案を示せるようになることが望ましい。

- 本ケーススタディでは、消火訓練の実施、およびスプリンクラー設備の設置の各効果が、他の防火対策に比した高かった。両対策の有効性は広く認識されているが、上記のような課題が残されている中では、他の対策と比した優位性がどの程度あるのか、現時点で判断を下すことは難しいため、留意が必要である。
- 本防火性能評価プログラムでは、単一の火源から派生的に生じる被害形態を網羅的に評価した上で、その結果を関連する個別性能の評価に反映させる方式を採用している。これにより、7つある個別性能を横並びで評価できるようになっているが、建築物が置かれた状況によっては、特定の火災シナリオや被害を回避するための対策を検討したい場合があるかもしれない。こうした検討には、建築主あるいは設計者が重視している火災シナリオや被害に焦点を絞った評価を行えるように評価プログラムに変更を加えることも考えられる。しかし、その負担を考慮すれば、出力された7つの個別性能、あるいは個別性能を計算する過程で得られる指標を読み替えることで、特定の火災シナリオや被害に関する評価を行えるようにすることが有効と考えられる。

5. まとめ

本研究では、非住宅建築物の防火性能の高度化の利点を分かりやすく説明するツールとして利用することを目的として、出火防止性能、火災成長防止性能、倒壊防止性能、延焼防止性能、避難安全性能、消火活動支援性能、機能維持性能の7つの個別性能から構成される新しい防火性能指標を開発した。これらのうち、現時点では評価方法が定まっていない出火防止性能および消火活動支援性能を除く、5つの個別性能の計算手続きを示した。計算手続きでは、建築物の内部で火災が発生し、拡大する過程をイベントツリーで表現し、これを構成する各事象の発生確率および最終的な被害を、現象の工学的知見に基づき定式化した。ここに、各種対策の効果を反映させることで、それらが担う個別性能を評価できるようにした。さらに、計算手続きを実装したプログラムを使用して、用途および規模が異なる6つの建築物を対象としたケーススタディを行った。各種防火対策が講じられた場合の性能向上効果を調べて、新たに開発した防火性能指標の特徴と課題を分析した。

新たに開発した防火性能指標およびその評価手続きでは、住宅性能表示制度における課題を踏まえ、建築物の性能を「部分の仕様」から判断するのではなく、これを「全体の性能」に換算している。こうすることで、より直感的な性能の把握を行えるようにするとともに、「全体の性能」の向上につながる手段の多様性を許容している。ただし、依然として検討途上の上に残されている部分もあり、今後の継続的な検討が必要である。個別の課題は各章にまとめた通りであるが、より全体的な課題を整理すると以下ようになる。

- ・ 本評価指標は7つの個別性能から構成されるが、このうち出火防止性能と消火活動支援性能の評価手続きは整備されないままとなっている。また、評価手続きが整備された5つの個別性能についても、本来であれば性能向上への寄与を評価すべき対策のうち一部しか考慮できていないものもある。こうした個別性能の評価手続きについては、随時整備または改良を加えていく必要がある。
- ・ 性能評価プログラムにおいて、出火率、収納可燃物の火災成長率、同じく密度、在館者密度、消火活動の奏効率など、火災性状を左右する一部のパラメータの値は統計データに基づいて設定してある。これらは、いずれも建築物の維持管理の状態に左右されるものであり、本来は建築物によって様々であるはずだが、消火活動の奏効率を除き、用途に共通の値を設定することになっている。しかし、建築物の維持管理状況の改善を促す上では、実態に応じた値を設定できるようにする必要がある。
- ・ 本評価指標では、同じ立地、用途、規模の建築物の基準的条件に対する相対値として防火性能（F 値）を表現している。F 値を算出する際に設定する基準値の決め方には任意性があるが、建築基準法で要求される最低限の水準を目安に設定することは可能である。ただし、そのようにするにしても一意に決めることが難しい場合もあり、評価結果

に一定のばらつきを伴うことが避けられない。このため、何らかの絶対的な尺度に基づく評価を行う余地について検討する必要がある。

- 本評価指標では、火災安全に係る建築物「全体の性能」を評価することで、指標としての分かりやすさの向上を図っている。しかし、建築物の防火設計仕様の採否を判断する建築主は、建築物の性能に関する専門家であるとは限らないため、評価結果の提示にあたっては丁寧な説明が求められる。そこで、本評価指標の解説と、同指標を活用した防火設計事例を示したガイドラインを作成するなどして、本評価指標に対する理解の増進を図る必要がある。

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of N I L I M

No. 72 July 2023

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは (事務局課・電話)

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675