

# 「あらかじめの検討」に基づく避難安全検証のオフィスビルへの適用

山口 純一

## Evacuation Safety Design Based on a Preliminary Verification Method for an Office Building

Junichi Yamaguchi

### Abstract

We present a basic concept and its application to evacuation safety design, which was based on a preliminary verification method. The application demonstrated the evaluation method and the calculated results for a specific office building. The features of this evaluation method were as follows: (1) this evaluation method can evaluate a room with a complex shape; (2) this evaluation method can predict the pre-movement time of an evacuation based on an engineering method; (3) this evaluation method can calculate a room ratio according to the shape of a standard room, the type of rooms, and the areas of rooms.

### 概要

本論文では、避難安全検証において「あらかじめの検討」を活用した合理的な評価法の基本的な考え方および適用事例を示した。適用事例では、オフィスビルを対象に本評価法を適用した場合の検討手順および計算結果を示した。本評価法の特長は以下の通りである。(1)複雑な形状の空間の評価が可能である。(2)避難開始時間を工学的手法に基づき予測することが可能である。(3)基準室の空間形状、各室の用途および各室の床面積に応じて付属室の割合を計算することが可能である。

## 1. はじめに

建築火災時の避難安全設計では、建築火災時の利用者の避難安全性を確保するため、建物の空間特性や利用者の特性に応じて適切な避難経路を確保し、その避難経路を保護するための対策を講じることが重要である。避難安全設計の設計ルートは、建築基準法に定められた仕様基準に基づき設計する方法(ルートA)、設計火源と避難安全性に関わる許容値(一般的には、避難完了時点の煙層下端高さ $\geq$ 床面+1.8m)を定め避難シミュレーション等の工学的手法を用いて避難施設等の設計を行う方法(ルートBまたはC)がある。後者の方法によって避難安全性が確かめられた場合、避難関連規定の一部を適用除外とすることができる<sup>1)</sup>。

これまで避難安全検証に係る構造方法等の認定(大臣認定;ルートC)については、大臣認定取得後に間仕切り等の変更が生じた場合は、再度大臣認定を取得する必要があった。しかし、平成19年12月28日付け国住指第3569号において、国土交通省住宅局建築指導課長から、技術的助言『構造方法等の認定に係る「あらかじめの検討」について』が示されたことによって、あらかじめ間仕切り位置の変更を見込んだ検討を行えば、幅のある認定を取得することが可能となった。つまり認定の中で規定されている範囲内の変更については、新たに認定を取得することなく、計画を変更することが可能となった<sup>2)</sup>。

## 2. 「あらかじめの検討」の概要

### 2.1 「あらかじめの検討」の手順

「あらかじめの検討」を適用しない一般的な設計手順の場合は、設計の初段階でプラン(図面)を作成し、検証および性能評価を行う過程において、プランの再検討、再々検討を行い最終プランを決定する。一方、「あらかじめの検討」を適用した場合の設計手順は、Fig. 1 および Fig. 2 に示すように大きく2段階に分かれる。

Fig. 1 は「あらかじめの検討」と呼ばれる部分の検討手順を示している。「あらかじめの検討」の最終的なゴールは、工学的手法に基づき安全性が確かめられた空間形態を設計ルール(室用途、床面積、歩行距離、出口幅、内装の種類等など)として示すことである。設計ルールの作成にあたっては、「あらかじめの検討」の適用範囲を事前に定めることが重要である。また、「あらかじめの検討」の前提条件設定や想定される計画案の類型化は、設計ルール案の作成や避難安全性能の検証を行う上で必要となる。なお、避難安全性能の検証は想定した設計ルールの一番厳しい(不利な)条件の下で行われるため、実務上は設計自由度と避難安全対策のバランスが重要となる。

Fig. 2 は、Fig. 1 に示す「あらかじめの検討」により作成された設計ルールに基づき設計する場合の手順である。「あらかじめの検討」を適用した場合は、安全性の確かめられた設計ルールが存在するので、設計者は設計ルールを片手に自らの判断でプランの妥当性を検討でき、また間仕切り変更の度にシミュレーションする手間を省くことができるので設計スケジュールに余裕が生まれる。

## 2.2 「あらかじめの検討」の適用対象例

ルートCにおける「あらかじめの検討」は、テナントオフィスや商業施設へ適用されるのが一般的である。Table 1に「あらかじめの検討」の適用対象例を示す。

事務所に「あらかじめの検討」を適用する場合は、会議室等の設置および用途変更について検討するのが一般的である。飲食店舗や物販店舗への適用は、厨房や倉庫の設置、出入口の設置や移動および共用通路に面するファサード仕様の変更が「あらかじめの検討」の対象となる。なお、店舗等においては共用通路の形状の変更は対象外とするのが一般的である。

## 2.3 本評価法の特徴

テナントオフィスや商業施設における間仕切り壁の位置や形態はテナントの要望で多様であり、また設計段階及びその後においても度々変更が発生する。避難安全性の観点では、貸室内が複数の居室に間仕切られ、さらに複雑化すると非火災室在館者の火災覚知が遅れ、それに伴い危険性が高くなる。このような覚知の遅れが想定される場合、告示に基づき避難開始時間を設定すると、火災室と非火災室の避難開始時間に3分以上の差があるため、特に非火災室である居室の検証が成立しにくいという課題がある。そこで、本評価法は、貸室内が複数の居室に間仕切られた(小部屋が発生した)場合の避難安全検証において、非火災室在館者の行動シナリオ(出火から避難開始に至るまでのシナリオ)に基づき非火災室の避難開始時間を設定する手法を開発し、より合理的な計画を実現することを可能とした。また、本評価法は、物販店舗のような平面形状が複雑な空間における煙流動性状の予測にも対応可能である。

## 3. あるオフィスビルへの適用事例

ここでは、地下3階、地上29階、延べ面積約20万m<sup>2</sup>の複合用途建築物への適用事例を紹介する。「あらかじめの検討」を適用したオフィスは、本建物の15～28階に位置する。本オフィスは貸室であり、フローア貸し(1つのテナントが入居)の場合や複数のテナントが入居する場合が想定される。また、それぞれの貸室内に間仕切り壁が発生する。このようなテナントオフィスの特性を考えると、間仕切りが変更される毎に安全性を再検証するよりはむしろ、安全性の確保できる範囲(室用途、床面積、歩行距離、出口幅、内装の種類等の組合せ)について「あらかじめの検討」を行い、その範囲内で運用した方が合理的である。以下では、具体的な適用方法および検証結果を述べる。

### 3.1 基準階プランと防災計画の基本方針

Fig. 3 にオフィス基準階プランを示す。貸室エリアの床面積は1,382.4 m<sup>2</sup>であり、同一階に複数のテナントが入居する場合は、間仕切り壁によって最大4分割される

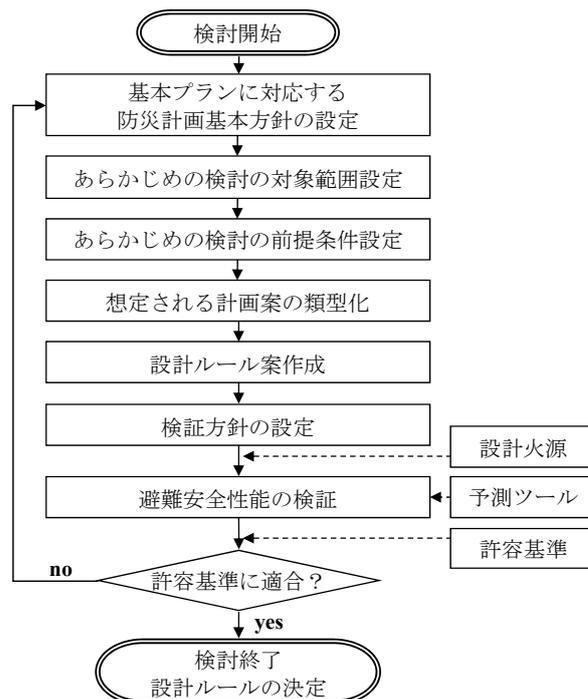


Fig. 1 「あらかじめの検討」による設計ルールの作成手順

Procedure of Preliminary Verification Method

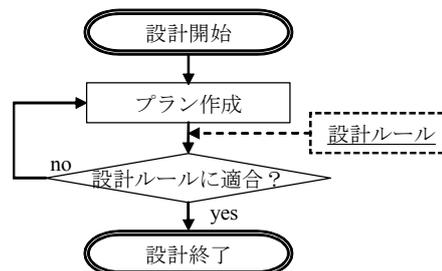


Fig. 2 「あらかじめの検討」に基づく設計の手順

Procedure of evacuation safety design based on Preliminary Verification Method

Table 1 「あらかじめの検討」の適用対象例  
Application experience of Preliminary Verification Method

用途	「あらかじめの検討」の内容
事務室	会議室等の設置および用途の変更
飲食店舗	厨房等の設置(移動), 出入口の設置(移動), 出口幅の変更, 共用通路に面するファサード仕様の変更
物販店舗 (平場形式 <sup>※2</sup> , ショップ形式 <sup>※3</sup> )	倉庫等の設置(移動), 出入口の設置(移動), 出口幅の変更, 共用通路に面するファサード仕様の変更 <sup>※1</sup>

※1 ショップ形式のみ

※2 百貨店の様に間仕切り壁の少ない店舗形態

※3 飲食フロアの様に独立した店舗が並んだ店舗形態

計画である(ただし、簡略化のため実在のプランと異なる)。貸室間の間仕切り位置は Fig. 3 の二重点線の位置とし、各貸室は Fig. 3 に示す構成単位(Unit)または隣り合う複数の Unit を組み合わせて構成する。Table 2 に室条件の一覧を示す。また、以下に防火および避難計画の基本方針を示す。

(1) 火災拡大防止計画 防火区画は層間区画(水平区画)とし他階への延焼防止を図っている。また、エレベーターシャフト、階段室、DS等は縦穴区画されている。

(2) 煙制御計画 貸室は、共用廊下との間を準耐火構造の壁又は不燃材料で覆われた壁(フロートガラス等火災時の加熱で容易に破損するものは不可)もしくは令第112条第14項第二号に適合する防火設備で構成された区画(以後、遮煙区画と呼ぶ)とし、さらに機械排煙(天井チャンパー方式:風量 $0.5\text{m}^3/\text{分}/\text{m}^2$ )を設置することによって、共用廊下への漏煙量の低減を図る計画としている。なお、同一階に複数のテナントが入居する場合に出火した貸室の煙を有効に排出できるようにするため、貸室間の間仕切り壁は上階スラブまで達する不燃間仕切り壁とし、貸室間の空気の流通を防止する計画としている。共用廊下の中央部には防煙垂れ壁( $h=0.5\text{m}$ )を設置し、廊下全体が煙に汚染されないよう配慮している。なお、共用廊下の排煙は機械排煙(風量 $0.5\text{m}^3/\text{分}/\text{m}^2$ )である。付室兼非常用EV乗降ロビー(Fig. 3およびTable 2では付室と表記)は防火区画とし、機械排煙(法定風量)を設置している。

(3) 避難計画 特別避難階段(Fig. 3では特避と表記)は共用廊下の両端に配置し、確実な2方向避難を確保することにより安全性を高めている。貸室から階段に至る避難経路は、貸室→共用廊下(遮煙区画)→付室兼非常用EVロビー(防火区画)→特別避難階段(防火区画)と明かな計画としている。

### 3.2 貸室の間仕切り計画

共用廊下等の共用部は「あらかじめの検討」の対象外とし、貸室内の間仕切り設置または変更に対する「あらかじめの検討」を行う。なお、「あらかじめの検討」を行うにあたり、以下に示す各項目に対して制限(前提条件)を設けている。

(1) 貸室内の構成 貸室内に間仕切り壁が設置される場合(貸室内に小部屋を設置する場合)、貸室は共用廊下への出入口を有する室である基準室と基準室への出入口を有する室である付属室で構成する(Fig. 4参照)。

(2) 出入口の設置 貸室は、Unit(貸室の構成単位)毎に共用廊下への出入口を2箇所設置することを原則とするが、出入口付近に受付等が設置される可能性を考慮して、一部の出入口は使用できないものとして検証を行う(Table 3参照)。出入口幅は1箇所当たり $w1.7\text{m}$ (有効 $1.6\text{m}$ 以上)とする。

(3) 貸室の各居室から共用廊下に至る避難経路 貸室内に間仕切り壁が設置される場合は、各居室から共

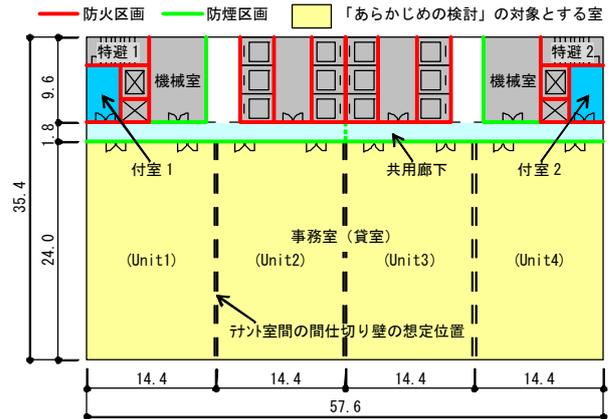


Fig. 3 あらかじめの検討の対象プラン(単位:m)  
Object plan (Unit:m)

Table 2 室条件一覧  
List of room conditions

室名	床面積 [ $\text{m}^2$ ]	天井高 [m]	内装の 種類	排煙量 [ $\text{m}^3/\text{分}/\text{m}^2$ ]
貸室 (全体)	1382.4	2.8	不燃	0.5 (天井チャンパー方式)
共用廊下	103.7	2.6	不燃	0.5
付室1,2	16.8	2.6	不燃	法定風量

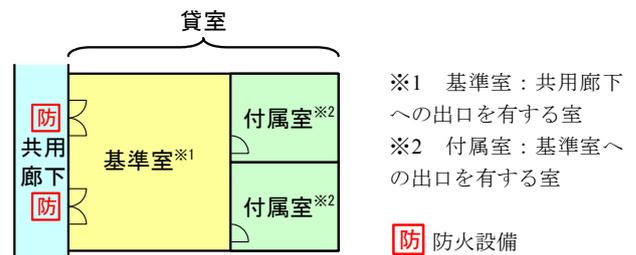


Fig. 4 基準室, 付属室, 貸室の定義  
Definition of rooms

Table 3 計算上使用する出入口(幅, 箇所数)  
Exit width used by calculation

貸室の Unit 構成数	貸室の 床面積[ $\text{m}^2$ ]	出入口幅 ×箇所数
1	345.6	$w1.7\text{m}$ (有効 $1.6\text{m}$ )×2箇所
2	691.2	$w1.7\text{m}$ (有効 $1.6\text{m}$ )×3箇所
3	1036.8	$w1.7\text{m}$ (有効 $1.6\text{m}$ )×4箇所
4	1382.4	$w1.7\text{m}$ (有効 $1.6\text{m}$ )×5箇所

用廊下に至るまでの避難経路において2以上の室を経由することがないように、下記の通り計画する。

- ① 「基準室(居室)」→「共用廊下」
- ② 「付属室(居室)」→「共用廊下」
- ③ 「付属室(居室)」→「基準室(居室または廊下)」  
→「共用廊下」

(4) 貸室内の最大歩行距離 一部の出入口は使用されないことを前提として検証するが、その場合共用廊下に至る出入口の偏在の可能性が新たに生じる。このことから、貸室出入口のバランス良い配置を誘導するため、Fig. 3 に示すプランを考慮した上で貸室内の最大歩行距離を 32.5m と設定した。

(5) 自動火災報知設備、非常放送設備の設置 基準室および付属室には、自動火災報知設備および非常放送設備が設置されていることを前提とする。

(6) 貸室内の間仕切りの形態 貸室内の間仕切り形態(基準室の用途、共用廊下への出入口の視認性、付属室の偏在等)に応じて6つの間仕切り形態に類型化した。Table 4 に貸室内の間仕切りの形態の類型化の一例と、その避難計画上の特徴と評価上の特徴・注意点を示す。また、Table 5 に用語の定義を示す。基準室が居室である場合は基準室と付属室の位置関係等に応じてタイプS、A、BおよびCの4タイプを設定し、基準室が廊下である場合は共用廊下に至る出入口の視認性等に応じてタイプY

Table 4 貸室内の間仕切りの形態(タイプ)の避難計画上の特徴と評価上の注意点

		Feature and notes of plan	
	間仕切り形態の概念図	避難計画上の特徴	評価上の特徴・注意点
タイプS		<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室は居室である。</li> <li>基準室コアの貸室に対する割合が大きい(50%以上)。</li> <li>付属室は基準室コアに面してバランス良く配置されている。</li> <li>付属室の出入口から共用廊下の出入口を目視できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室出火と付属室出火の双方についての評価が必要</li> <li>複雑な煙流動は発生しないので、一般的な煙層降下時間等の比較による評価が可能</li> <li>火災初期の火災覚知が容易</li> <li>共用廊下の出入口の検索が容易</li> </ul>
タイプA		<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室は居室である。</li> <li>基準室コアの貸室に対する割合が大きい(50%以上)。</li> <li>付属室は基準室コアに面していないが、バランス良く配置されている。</li> <li>付属室の出入口から共用廊下の出入口および基準室コアを目視できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室出火と付属室出火の双方についての評価が必要</li> <li>複雑な煙流動は発生しないので、一般的な煙層降下時間等の比較による評価が可能</li> <li>(タイプSより)火災初期の火災覚知が困難→煙拡散および火災確認行動に基づき避難開始の遅れを考慮</li> <li>共用廊下の出入口の検索が容易</li> </ul>
タイプB		<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室は居室である。</li> <li>基準室コアの貸室に対する割合が大きい(50%以上)。</li> <li>付属室は基準室コアに面して配置されていない。</li> <li>付属室出入口から共用廊下の出入口を目視できない。</li> <li>付属室の出入口から基準室コアを目視できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室出火と付属室出火の双方についての評価が必要</li> <li>複雑な煙流動(折れ曲がりのある通路状の空間)に配慮した評価が必要→二方向避難確保</li> <li>過度な滞留の防止に配慮した評価が必要→付属室の割合の上限を設定</li> <li>火災初期の火災覚知が困難→煙拡散および火災確認行動に基づき避難開始の遅れを考慮</li> <li>共用廊下の出入口の検索が困難→明快な避難経路確保</li> </ul>
タイプC		<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室は居室である。</li> <li>基準室コアの貸室に対する割合が小さい(25%以上)。</li> <li>付属室は基準室コアに面して配置されていない。</li> <li>付属室出入口から共用廊下の出入口を目視できない。</li> <li>付属室の出入口から基準室コアを目視できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室出火と付属室出火の双方についての評価が必要</li> <li>複雑な煙流動(折れ曲がりのある通路状の空間)に配慮した評価が必要→二方向避難確保</li> <li>過度な滞留の防止に配慮した評価が必要→付属室の割合の上限を設定</li> <li>火災初期の火災覚知が困難→煙拡散および火災確認行動に基づき避難開始の遅れを考慮</li> <li>共用廊下の出入口の検索が困難→明快な避難経路確保</li> </ul>
タイプY		<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室は廊下(火災発生の恐れのない室)である。</li> <li>付属室の貸室に対する割合が大きい。</li> <li>付属室の出入口から共用廊下の出入口を目視できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>付属室出火についての評価が必要</li> <li>過度な滞留の防止に配慮した評価が必要→付属室の割合の上限を設定</li> <li>複雑な煙流動(折れ曲がりのある通路状の空間)に配慮した評価が必要→二方向避難確保</li> <li>火災初期の火災覚知が困難→煙拡散および火災確認行動に基づき避難開始の遅れを考慮</li> <li>共用廊下の出入口の検索が容易</li> </ul>
タイプZ		<ul style="list-style-type: none"> <li>基準室は廊下(火災発生の恐れのない室)である。</li> <li>付属室の貸室に対する割合が大きい。</li> <li>付属室は遮煙区画である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>付属室出火についての評価が必要</li> <li>複雑な煙流動(折れ曲がりのある通路状の空間)に配慮した評価が必要→二方向避難を条件としない代わりに付属室を遮煙区画とする</li> <li>過度な滞留の防止に配慮した評価が必要→付属室の割合の上限を設定</li> <li>火災初期の火災覚知が困難→避難開始の遅れを考慮(+3分)</li> </ul>

※各用語の定義は Table 5 参照

およびZの2タイプを設定した。

タイプS, A, BおよびCは, 基準室内に付属室が存在しない矩形の部分(以後, 基準室コアと呼ぶ)を確保することを前提とし, 基準室コアと付属室の位置関係と基準室用途に応じて分類している。タイプSおよびAは付属室が貸室全体にバランス良く配置されていることを前提とし, さらにタイプSの付属室出入口は基準室コアに面し, タイプAの付属室出入口は基準室コア近傍に設置されることとした。タイプBは付属室のバランスや出入口の設置位置の制限が設けられていない。タイプCはタイプBと基本的に同じであるが基準室用途を受付に限定し, 基準室で出火した際の煙発生量を低減させている。

タイプYおよびZは, 基準室が廊下(火災発生の恐れのない室)であることを前提とするが, 基準室出火の危険性が小さくなるため, タイプS等に比べて付属室の割合を大きくとることができる。

なお, 避難安全性には避難計画上の制限に対する自由度(出入口の視認性確保など)と在館者数(付属室の大きさ)が大きく影響する。本検討では, 計画の自由度が高い(制限が少ない)場合は許容される在館者数または貸室に対する付属室の割合(以後, 付属室の割合  $\beta$  と呼ぶ)が小さくなる仕組みとしている。

### 3.3 設計ルール(案)の作成

設計ルール(案)は, 先に3.2節で示した貸室の間仕切り計画に応じて決定する。この設計ルール(案)の下で避難安全性が確保されていることを検証し, 安全性が確認された後に正式な設計ルールとして使用できる。ここでは, Table 4 に示す間仕切りの形態(タイプ)のうちのタイプSとCの設計ルール(案)を Table 6 に示す。なお, 本評価法は, 付属室の割合  $\beta$  の範囲をあらかじめ設定せず, 安全性が確保される範囲内で付属室の割合  $\beta$  を設定する手法を採用している。

### 3.4 避難安全検証の概要

Table 6 に示した設計ルール(案)の下での避難安全検証について説明する。避難安全検証は, 居室から階段に至るまでの部分毎に行うが, 紙面の都合上ここではタイプSの貸室内の居室避難の検証方法を中心に述べる。なお, 共用部の避難安全検証(共用廊下から階段に至るまでの部分)は, 3.1 節に示す防災計画の基本方針に従い安全性を確保するとともに, 貸室の「あらかじめの検討」で想定される一番厳しい条件(最大在館者数, 最大可燃物密度等)の下での階避難安全検証を行っている。

本検討では, 貸室は共用廊下への出入口を有する基準室と基準室への出入口を有する付属室で構成されることを前提とする(Fig. 4 参照)。従って, 付属室から共用廊下に至るまでの避難経路ならびに火災室と非火災室の関係は Fig. 5 に示すようになる。2.3 節で述べたように, 非火災室の在館者は火災室の在館者と比べて火災覚知に遅れを生じる可能性が高いため, 検証上は非火災室の避難開

Table 5 用語の定義

Definition of term	
用語	定義
Unit	貸室の構成単位。各貸室は1つのUnitまたは隣り合う複数のUnitを組み合わせて構成される
基準室	共用廊下への出入口を有する室
付属室	基準室への出入口を有する室
火災発生の恐れのない室	平成12年建告第1440号に適合する室(廊下, 便所等)
基準室コア	基準室内の付属室が存在しない矩形の部分
可燃物密度	平成12年建告第1441号に従い室の用途に応じて設定される数値
遮煙区画	準耐火構造の壁又は不燃材料で覆われた壁(フロートガラス等, 火災時の加熱で容易に破損するものは不可)もしくは令第112条第14項第二号に適合する防火設備で構成された区画
付属室の割合	当該貸室に占める付属室の床面積(付属室が複数存在する場合はその合計)の割合

Table 6 タイプS, Cの設計ルール(案)

Design rule on type S and C		
項目	タイプS	タイプC
基準室用途	事務室, 受付	受付
基準室コア	基準室コアの割合は50%以上	基準室コア割合は25%以上
基準室の視認性等	付属室の出入口は基準室コアに面している 基準室の各部分から基準室コアを目視できる	付属室の室内または出入口付近から基準室コアを目視できる。
出入口の視認性等	付属室の室内または出入口付近および基準室コアから共用廊下への出入口を目視できる	付属室の出入口付近から, 共用廊下への出入口を目視できる位置に至るまでの歩行経路は直線またはL字
重複区間制限	建築基準法に準ずる	付属室の出入口から共用廊下に至る歩行経路の重複区間は5m以下
付属室の遮煙区画制限	可燃物密度が560MJ/m <sup>2</sup> を超える付属室	可燃物密度が160MJ/m <sup>2</sup> を超える付属室 床面積が100m <sup>2</sup> を超える付属室
付属室の割合 $\beta$	安全性が確保できる数値以下	安全性が確保できる数値以下

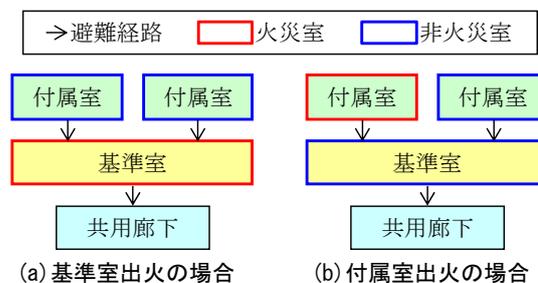


Fig. 5 火災室と避難経路の関係

Relation between the fire room and escape route

始時間をどのように設定するかが重要なポイントになる。なお、各式の記号の凡例は最終ページに示されている。

### 3.5 避難開始時間 $t_{start}$

ここではタイプSに該当する場合の非火災室の避難開始時間を設定する方法について詳しく述べ、その他のタイプについては考え方のみを示すこととする。

#### 3.5.1 タイプSの場合

タイプSの設計ルール (Table 6 参照) に基づく場合、付属室の出入口は基準室コアに面するように計画されるため、付属室の出入口付近から、基準室コアおよびそれに面するその他の付属室出入口を目視で確認できる。このような間仕切り形態においては、非火災室の避難開始の遅れはない(一斉避難)として、告示に定められる居室避難開始時間(=  $2\sqrt{A_{area}}$  [秒])を用いるのが一般的である。しかし、基準室コア以外の基準室の部分で出火した場合や付属室で出火した場合、非火災室在館者は火源を直接目視することができないため、一斉避難と見なせない場合も考えられる。そこで本検証においては、基準室出火、付属室出火の何れにおいても、非火災室の在館者は基準室コアにおける火源または煙を確認するまでは避難開始しない(できない)と考え、火災が確認できる状態になるまでの時間と告示に定められる一斉避難開始時間(=  $2\sqrt{A_{area}}$  [秒])の何れか大きい値を避難開始時間として採用することとした。

(1) 基準室で出火した場合の避難開始シナリオ  
基準室コアで出火した場合の火災確認は比較的容易なので一斉避難と見なすことができる。ここでは基準室コア以外の部分で出火した場合について検討する(Fig. 6 参照)。

付属室在館者は、火災感知器(第一報)の鳴動後( $t_{detect}$ )に火災確認のため付属室出入口まで歩行し( $t_{check}$ )、付属室出入口付近にて火災(煙)を確認するというシナリオを想定した。

基準室コア以外の部分での出火を想定した場合、付属室出入口付近にいる在館者は火源を直接目視することができないため、付属室在館者が出入口付近に到達するまでの行動と基準室コア以外の部分で発生した煙の拡散状況によって避難開始に至るシナリオは異なる。

付属室在館者が出入口付近に到達するまでに基準室コア以外の部分で発生した煙が基準室コアに漏れ出している場合は、付属室在館者は出入口付近に到達した時点( $t_{detect}+t_{check}$ )で火災を覚知できる。一方、出入口に到達した時点では煙が基準室コアに漏れ出していない場合は、その時点では火災覚知に至らないが、その後基準室コアに煙が漏れ始めた時点( $t_{leak}$ )で煙を目視し火災覚知に至る。従って、付属室在館者が出入口付近に到達するまでに要する時間  $t_{detect}+t_{check}$  と基準室コアに煙が漏れ始める時間  $t_{leak}$  とを比較し、何れか大きい値を火災が確認できる状態になるまでの時間として採用すれば良い。以上より、基準室出火時の避難開始時間は、前述の火災が確認できる状態になるまでの時間に告示に定められる一斉避

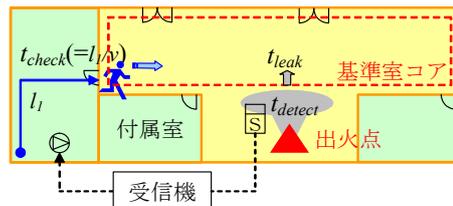


Fig. 6 基準室コア以外の部分で出火した場合の概念図  
Conceptual diagram (breaking out excluding the core of standard room)

難開始時間を下限値として設定し、式(1)に基づき算出した。

$$t_{start} = \max(t_{detect} + t_{check}, t_{leak}, 2\sqrt{A_{area}}) \dots \dots \dots (1)$$

i) 火災感知器(第一報)が作動する時間  $t_{detect}$  本検討では煙感知器の出力は感知器近傍の温度上昇に比例すると見なして火災感知器が作動する時間  $t_{detect}$  を算出する方法<sup>4), 5)</sup>を用いた。火災感知器が作動する時間  $t_{detect}$  は、火源発熱速度が火災感知器の作動に必要な発熱速度  $Q_{detect}$  に達した時点として、下式により算定した。なお、文献4), 5)に従い  $Q_{detect}$  を算出した結果、概ね 42~50kW であった。

$$t_{detect} = (Q_{detect} / \alpha_f)^{0.5} \dots \dots \dots (2)$$

ii) 付属室在館者が出入口まで歩行する時間  $t_{check}$   
付属室在館者が出入口まで歩行する時間  $t_{check}$  は、付属室の各部分から付属室出入口に達するまでの歩行距離  $l_1$  を歩行速度  $v$  で除して算出した。なお、本検討では、付属室出入口の偏りを制限するため、付属室の各部分から付属室出入口に至るまでの歩行距離を付属室床面積  $A_a$  の平方根の2倍以下とする条件を設けた。

$$t_{check} = \frac{l_1}{v} \leq \frac{2\sqrt{A_a}}{v} \dots \dots \dots (3)$$

iii) 基準室コア以外の部分で発生した煙が基準室コアに漏れ始める時間  $t_{leak}$   
基準室コア以外の部分で発生した煙が基準室コアに漏れ始める時間  $t_{leak}$  は、二層ゾーンの概念に基づく簡易予測式<sup>6)</sup>を用いて計算した。

$$t_{leak} = \left\{ \frac{5 \cdot \rho(A_f - A_{f-core})}{2 \cdot C_m(\alpha_f + \alpha_m)^{1/3}} \left( \frac{1}{(H_f - z_c)^{2/3}} - \frac{1}{H_f^{2/3}} \right) \right\}^{3/5} \dots \dots \dots (4)$$

また、天井流の厚さ  $z_c$  は、THE SFPE HANDBOOK<sup>7)</sup>より安全側に設定して、

$$z_c = 0.112H_f \dots \dots \dots (5)$$

と与えた。ここで、煙層厚さを天井高さの11%と設定したときの煙拡散時間の予測値と実験値との比較において、安全側の予測結果が与えられることを確認している<sup>8)</sup>。なお、火災初期の煙流動(天井流)性状が複雑な空間(例えば、煙流動上のネックが存在する空間、L字やコの字な

どのクランクが存在する空間)へ適用する場合は、天井流の厚さ等についての検討が必要である。

Fig. 7は、前述の方法に従い基準室出火時( $\alpha=0.1\text{kW}/\text{s}^2$ )、付属室の割合 $\beta=0, 25, 50\%$ の付属室在館者の避難開始時間を算出した結果である。ただし、貸室床面積 $A_{\text{area}}$ と付属室床面積 $A_a$ 、基準室コアの床面積 $A_{f\_core}$ および基準室の床面積 $A_f$ の関係は以下の通りとした。なお、付属室は複数計画されるのが一般的だが、本検討では安全側の想定として付属室は1室( $A_a=\beta A_{\text{area}}$ )と扱った。

$$A_a = \beta A_{\text{area}} \dots\dots\dots(6)$$

$$A_{f\_core} = 0.5 A_{\text{area}} \dots\dots\dots(7)$$

$$A_f = A_{\text{area}} - A_a = (1 - \beta) A_{\text{area}} \dots\dots\dots(8)$$

Fig. 7によると、付属室の割合 $\beta$ が25%以下においては、基準室出火時の避難開始時間は告示で定められている避難開始時間の計算結果( $=\sqrt{A_{\text{area}}}/30$ [分])とほぼ等しい値となった。また、付属室の割合 $\beta$ が50%の場合は、火災確認に要する時間 $t_{\text{check}}$ が長くなるため、付属室在館者の避難開始に幾らかの遅れが生じる結果となった。なお、付属室の割合 $\beta$ が0%の場合には、 $t_{\text{detect}}+t_{\text{check}}$ は0、 $t_{\text{leak}}$ は最大値( $A_f - A_{f\_core} = 0.5 A_{\text{area}}$ )となるが、避難開始時間は一斉避難時間 $2\sqrt{A_{\text{area}}}$ で決定されている( $t_{\text{detect}}+t_{\text{check}} < t_{\text{leak}} < 2\sqrt{A_{\text{area}}}$ )。また、付属室の割合 $\beta$ が50%の場合の避難開始時間は、 $t_{\text{detect}}+t_{\text{check}}(A_a=0.5 A_{\text{area}})$ で決定されている( $t_{\text{leak}} < 2\sqrt{A_{\text{area}}} < t_{\text{detect}}+t_{\text{check}}$ )。

(2) 付属室で出火した場合の避難シナリオ 付属室で出火した場合も基本的な考えは基準室のコア以外の部分で出火した場合と同じである。繰り返しになるが、火災感知器(第一報)が作動した後に付属室在館者が出入口まで歩行して火災を確認するが、火元の付属室から煙が漏れている場合は出入口に到達した時点( $t_{\text{detect}}+t_{\text{check}}$ )で火災覚知するが、出入口に到達した時点では付属室から煙が漏れていない場合は付属室から煙が漏れ始めた時点( $t_{\text{leak}}$ )で火災覚知する(Fig. 8参照)。

避難開始時間の算定式は基準室のコア以外の部分で出火した場合の式(1)と同じであり、付属室在館者が出入口まで歩行する時間( $t_{\text{detect}}+t_{\text{check}}$ )、火元の付属室から基準室に煙が漏れ始める時間( $t_{\text{leak}}$ )ならびに告示に定められる一斉避難開始時間の最大値を採用した。

火災感知器が作動する時間  $t_{\text{detect}}$  と付属室在館者が出入口まで歩行する時間  $t_{\text{check}}$  の算出方法は、基準室で出火した場合と同じである。付属室で発生した煙が基準室コアに漏れ始める時間  $t_{\text{leak}}$  は、煙層が付属室出入口の開口上端( $H_D$ )に達した時点と考え、二層ゾーン概念に基づく簡易予測式<sup>6)</sup>を用いて計算した。ただし、式(9)によると付属室出入口の上端高さ  $H_D$  と付属室天井高さ  $H_a$  が等しい場合は  $t_{\text{leak}}=0$  となるので、 $H_D$  が  $H_a$  と等しいまたは開口上部に十分な下がり壁が設置されていない場合は式(9)の適用性についての検討が必要である。

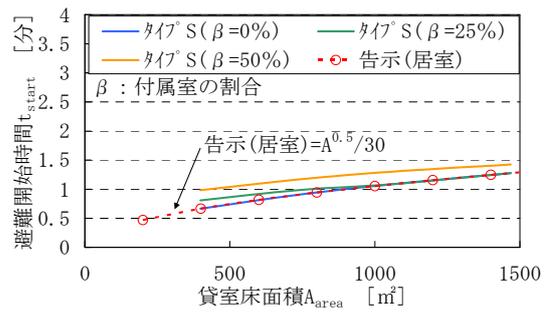


Fig. 7 基準室出火時の避難開始時間の試算例  
Calculation example for pre-movement time



Fig. 8 付属室で出火した場合の概念図  
Conceptual diagram (breaking out Attached room)

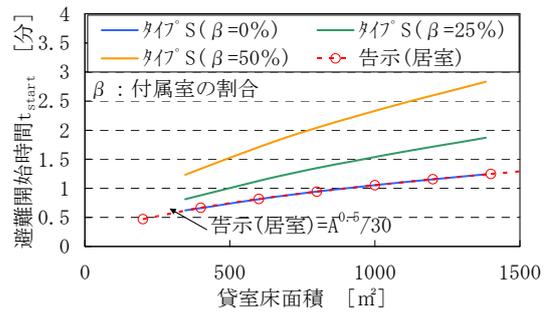


Fig. 9 付属室出火時の避難開始時間の試算例  
Calculation example for pre-movement time

$$t_{\text{leak}} = \left\{ \frac{5}{2} \cdot \frac{\rho A_a}{C_m (\alpha_f + \alpha_m)^{1/3}} \left( \frac{1}{H_D^{2/3}} - \frac{1}{H_a^{2/3}} \right) \right\}^{3/5} \dots\dots\dots(9)$$

Fig. 9は、付属室出火時( $\alpha=0.1\text{kW}/\text{s}^2$ )、付属室の割合 $\beta=0, 25, 50\%$ の火災室以外の付属室における在館者の避難開始時間を算出した結果を示したものである。なお、貸室床面積  $A_{\text{area}}$  と付属室床面積  $A_a$  および基準室の床面積  $A_f$  の関係は式(6)、式(8)に示す通りである。ここで、付属室出火を想定する場合、 $t_{\text{detect}}+t_{\text{check}}$ を算定する際に用いる付属室床面積  $A_a$  は非火災室である付属室の床面積、 $t_{\text{leak}}$ 算定時の  $A_a$  は火災室である付属室の床面積を用いなければならないが、本検討では安全側の想定として何れの場合においても  $A_a=\beta A_{\text{area}}$  と扱っている。また、付属室出入口の上端高さ  $H_D$  は2.1mである。

Fig. 7 と Fig. 9 の比較から、火源条件と付属室の割合が同じ条件においては、基準室出火よりも付属室出火の方

が避難開始時間は長くなる結果となる。ここで、付属室の割合  $\beta$  が 25% および 50% の場合の各時間の大小関係は、 $2\sqrt{A_{area}} < t_{detect} + t_{check} < t_{leak}$  であった。

**3.5.2 タイプS以外の場合** タイプS以外のタイプにおける避難開始時間の設定方法については紙面の都合上詳細な説明は割愛するが、間仕切り形態に応じた避難行動シナリオを想定し、そのシナリオに基づき避難開始時間を設定する手順はタイプSと同じである。各タイプにおける避難開始時間の基本的な考え方について簡単に触れておく(Table 7 参照)。

例えば、タイプAに該当する場合は、基準室内に折れ曲がりのある通路状の空間が形成されることはないので、一般的な二層ゾーンモデル等に基づく煙性状予測が可能である。タイプAに該当する場合の(非火災室の)避難開始時間は、Table 4 に示すタイプAの間仕切り形態等に基づき避難開始シナリオを想定し、そのシナリオの下で式(10)に示す通り設定した。ここで、 $t_{detect}$  は火災感知器(第一報)が作動する時間、 $t_{check}$  は付属室在館者が火災を確認するために歩行する時間、 $t_{smoke}$  は基準室全体に煙が拡散する時間である。また、タイプB、CやタイプYに該当する場合の避難開始時間は、基準室内に折れ曲がりのある通路状の空間が形成されること等を考慮して設定する。

$$t_{start} = \max(t_{detect} + t_{check}, t_{smoke}, 2\sqrt{A_{area}}) \dots \dots \dots (10)$$

**3.6 煙性状予測**

避難完了時点の煙層下端高さは二層ゾーン概念に基づく簡易予測式を用いて計算する。簡易予測式を用いる際に必要となる煙層密度  $\rho$  は  $1.0\text{kg}/\text{m}^3$  としておけば概ね安全側の計算結果が得られる<sup>6)</sup>とされているが、火災成長率が大きい居室や避難完了時間が長い居室では煙層密度  $\rho$  が 1.0 未満となる恐れがある。本検証では、避難完了時点の火源発熱速度等から避難完了時点の煙層密度  $\rho$  を算出し、その値を用いて避難完了時点の煙層下端高さを算出することとした。また、従来の簡易予測式<sup>6)</sup>では排煙設備の効果を見込むことができないが、本検証においては排煙設備の効果を検討できる簡易予測式<sup>9)</sup>を用いて計算した。ただし、安全側の設定として、付属室における排煙の効果を見込まずに検証した。

(1) 排煙開始時間 排煙開始時間  $t_{sm}$  は、在館者が避難を開始し、排煙口起動スイッチの設置位置(出入口近傍)に到達した時点と考え、避難開始時間と歩行時間の和として与えた。

$$t_{sm} = t_{start} + t_{travel} \dots \dots \dots (11)$$

(2) 排煙係数 筆者らは排煙に伴い煙層への正味の煙流入量が減少することを、巻き込み係数  $C_m$  が減少することに置き換えて考える方法を提案している<sup>9)</sup>。それによると、排出される煙の量に相当する分の巻き込み係数(以後、排煙係数と呼ぶ)を  $C_{sm}$  として、下式により定義される。

Table 7 各タイプにおける避難開始時間の設定方法

Calculation method in each type at pre-movement time	
タイプ S	付属室出入口が基準室コアに面していることを条件とし、告示(居室避難)における避難開始時間を採用する。ただし、火災が確認できる状態になるまでは避難開始しないと考え、一部の非火災室については火災覚知時間の遅れを考慮する。
タイプ A	付属室出入口が基準室コアに近接していることを条件とし、煙が基準室全体に拡散する時間等を考慮して避難開始時間を算定する。
タイプ B タイプ C	基準室コアまで火災を確認に行くこと(容易に確認できることが前提)を条件とし、煙が基準室全体に拡散する時間等を考慮して避難開始時間を算定する。
タイプ Y	付属室出入口から他の付属室出入口まで火災を確認に行くこと(容易に確認できることが前提)を考慮して避難開始時間を算定する。
タイプ Z	火災覚知に時間を要することから、告示(階避難)における避難開始時間(+3分)を採用する。

$$C_{sm} \equiv \frac{m_e}{Q_f^{1/3} Z^{5/3}} \dots \dots \dots (12)$$

排煙係数  $C_{sm}$  は、排煙開始時点の数値を採用すれば問題ないと考えられるが、火災室の煙発生量に対して排煙風量が過大な場合は排煙開始時点の数値を採用すると危険側の計算結果になる恐れがある<sup>9)</sup>ため、本検討では排煙開始時点の数値と避難完了時点の数値の何れか小さい方の排煙係数を採用することとした。また、火災ブルーム流量の巻き込み係数(=0.076)を上限値として設定した。

$$C_{sm} = \min\left(\frac{m_e(sm)}{Q_f^{1/3} Z_{sm}^{5/3}}, \frac{m_e(escape)}{Q_f^{1/3} H_{lim}^{5/3}}, 0.076\right) \dots \dots (13)$$

(3) 避難完了時点の煙層密度 本検証では、避難完了時点での火源から発生する熱量全てが、火災ブルームに連行された空気を暖める熱量と天井及び壁へ失熱する熱量に分配されるものと仮定した。その上で、煙層温度  $T_s$  はその条件下における定常状態に達した時点での温度とし安全側に見積もり、エネルギー保存式から導出される式(14)から避難完了時点の煙層温度を算出し、式(15)を用いて避難完了時点の煙層密度を算定することとした<sup>9)</sup>。また、従来の計算法(煙層密度を  $1.0\text{kg}/\text{m}^3$  と仮定して計算する方法)<sup>6)</sup>との整合性を取り、煙層密度  $\rho$  の上限は  $1.0\text{kg}/\text{m}^3$  とした。

$$T_s = \frac{Q_f(escape)}{c_p m_p + A_w h_k} + T_\infty \dots \dots \dots (14)$$

$$\rho_{(escape)} = \min(353/T_s, 1.0) \dots \dots \dots (15)$$

(4) 避難完了時点の煙層下端高さ 避難完了時点の煙層下端高さ  $Z_s$  は式(16)によって算定した<sup>9)</sup>。なお、式(16)の  $A_f$  は、基準室出火時は基準室の床面積を用い、付属室出火時は出火室である付属室の床面積と基準室の床面積の合計を用いた。

$$Z_s = \left[ \frac{2}{5} \cdot \frac{\alpha^{1/3}}{\rho_{(escape)} A_f} \{ (C_m - C_{sm}) t_{escape}^{5/3} + C_{cm} t_{sm}^{5/3} \} + \frac{1}{H_f^{2/3}} \right]^{-3/2} \dots(16)$$

### 3.7 付属室の割合 $\beta$

Fig. 10は各貸室における避難安全検証手順を示したものである。本検証では付属室の割合  $\beta$  の範囲はあらかじめ設定せず、安全性が確保できる範囲の付属室の割合  $\beta$  を算出できる検証方法を採用した。また、本検証では、避難完了時点の煙層下端高さ $Z_s$ と限界煙層高さ(=床面+1.8m)を比較する評価法とした。なお、天井チャンバー方式の排煙においては天井裏の蓄煙スペースおよび付属室の排煙は計算上見込まずに検証を行っている。

付属室の割合  $\beta$ (上限値)の計算結果の一例を Table 8 に示す。ただし、貸室の床面積は 691.2 m<sup>2</sup>、出入口は3箇所設置されている条件における値である。

基準室用途が事務室である場合、付属室の用途が役員室等における付属室の割合  $\beta$  は、タイプS, A, Bともに最大値の 50%となった(本検討では基準室コアの貸室に占める割合は 50%以上としている)。また、基準室用途が事務室、付属室用途が会議室等である場合、タイプS, A, Bとなるに従い付属室の割合は徐々に低下している。これは、タイプS, A, Bとなるに従い設計の自由度は向上するが(Table 4 参照)、逆に避難開始時間が長くなるため、同じ付属室の割合であっても検証が成立しにくくなるためである。なお、付属室の許容可燃物密度を低く制限し、または付属室の床面積を制限(例えば 100 m<sup>2</sup> を超える付属室は遮煙区画するなど)して付属室出火時の安全性を向上させることで、付属室の割合  $\beta$  をさらに大きくすることも可能である。

基準室の用途が受付(タイプC)の場合は基準室用途が事務室であるときよりも基準室出火時の煙発生量が抑制され、さらに付属室の許容可燃物密度や床面積に制限が加えられることによって、付属室の割合を 20%程度大きくすることが可能となる。基準室用途が廊下である場合(タイプY, Z)の付属室の割合  $\beta$  は、基準室で出火する恐れがないので、タイプCよりもさらに大きくなる。なお、タイプZは付属室の全てが遮煙区画されていることが前提となっている。

## 4. まとめ

本稿では、平成 19 年 12 月 28 日付け国住指第 3569 号で示された技術的助言『構造方法等の認定に係る「あらかじめの検討」について』を避難安全検証に活用した評価法の基本的な考え方および検証手順を示した。また、オフィスの貸室部分を対象として「あらかじめの検討」を適用した場合の設計ルールの設定方法、間仕切り形態に応じて避難開始時間を設定する方法ならびに付属

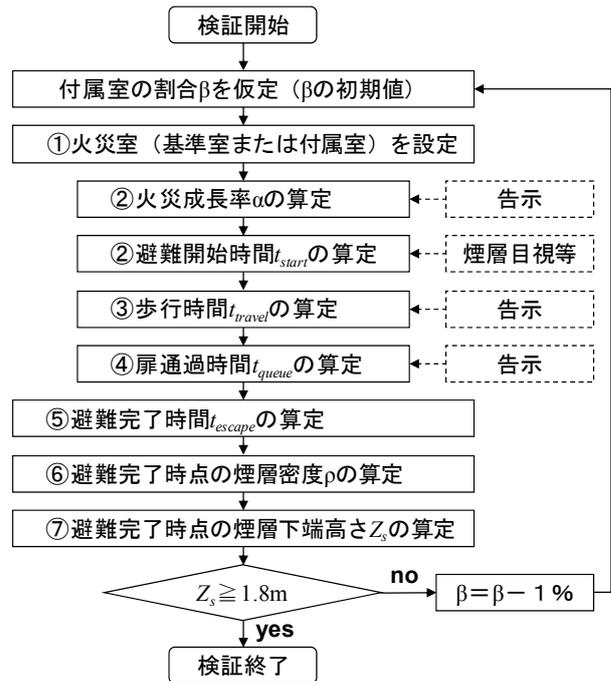


Fig. 10 避難安全検証手順(付属室の割合  $\beta$  の算出)  
Calculation Procedure of Evacuation Safety Verification

Table 8 付属室の割合  $\beta$  の上限値  
(貸室の床面積 691.2 m<sup>2</sup>、出入口 3 箇所の場合)  
Calculation result of attached room Ratio  $\beta$

基準室の条件		付属室の条件			
用途	間仕切り形態	用途	許容可燃物密度 $q_1$ [MJ/m <sup>2</sup> ] <sup>※1</sup>	許容床面積 [m <sup>2</sup> ] <sup>※1</sup>	付属室の割合 $\beta$ の上限値 [%] <sup>※2</sup>
事務室	タイプS	役員室等	560	-	50
		会議室等 <sup>※3</sup>	560	-	41
	タイプA	役員室等	560	-	50
		会議室等 <sup>※3</sup>	560	-	39
	タイプB	役員室等	560	-	50
		会議室等 <sup>※3</sup>	560	-	29
受付	タイプC	役員室等	240	100	65
		会議室等 <sup>※3</sup>	160	100	60
廊下	タイプY	役員室等	240	50	80
		会議室等 <sup>※3</sup>	160	50	75
	タイプZ	役員室等	※4	-	93
		会議室等 <sup>※3</sup>	-	-	82

※1 許容可燃物密度および許容床面積を超える付属室は遮煙区画とする

※2 付属室の割合  $\beta$   
= 付属室床面積の合計[m<sup>2</sup>] ÷ 貸室床面積[m<sup>2</sup>] × 100

※3 教室形式の会議室、貸会議室などの場合(在館者密度0.7人/m<sup>2</sup>として計算)

※4 付属室(全て)は遮煙区画とする

室の割合を算定する方法の一例を紹介した。「あらかじめの検討」の活用方法は、本稿に示した手法に限定されるものではないが、本稿で示した方法を応用・高度化する

ことによって、さらに合理的な評価法を幅広く展開することが可能である。

### 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課他編集:2001年度版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説,海文堂,(2001)
- 2) 国住指第3569号:構造方法等の認定に係る「あらかじめの検討」について,平成19年12月28日付け
- 3) 日本建築学会:建築物の火災安全設計指針,(2002)
- 4) 日本火災学会:火災と建築,pp.163-164,(2002)
- 5) 田中哮義:建築火災安全工学入門,日本建築センター,p76,(1993)
- 6) 田中哮義:改訂版建築火災安全工学入門,日本建築センター,pp.232-235,(2002)
- 7) SFPE, NFPA: THE SFPE HANDBOOK, Fire Protection Engineering (Third Edition), p.2-19,(2002)
- 8) 山口純一,他:火災初期の煙拡散性状に関する研究,平成21年度日本火災学会研究発表会梗概集,pp.106-107,(2009)
- 9) 間瀬亮平,山口純一:煙層下端高さに基づく避難安全検証法に関する研究,日本建築学会環境系論文集第652号,pp.481-490,(2010)

### 凡例

$A_a$  : 付属室の床面積[m<sup>2</sup>]  
 $A_{area}$  : 貸室床面積[m<sup>2</sup>]  
 $A_f$  : 基準室の床面積(付属室出火時は出火室である付属室の床面積を加算する)[m<sup>2</sup>]  
 $A_{f\_core}$  : 基準室コアの床面積 [m<sup>2</sup>]  
 $A_w$  : 煙層が接する部分の周壁面積 [m<sup>2</sup>]  
 $C_{sm}$  : 排煙係数[kg/kJ<sup>1/3</sup>.m<sup>5/3</sup>.s<sup>2/3</sup>]  
 $C_m$  : 巻き込み係数(=0.076)[kg/kJ<sup>1/3</sup>.m<sup>5/3</sup>.s<sup>2/3</sup>]  
 $c_p$  : 定圧比熱[kJ/kgK]  
 $H_a$  : 付属室の天井高さ[m]

$H_D$  : 基準室に面する付属室の扉高さ[m]  
 $H_f$  : 基準室の天井高さ[m]  
 $H_{lim}$  : 限界煙層高さ[m](=床面+1.8m)  
 $h_k$  : 避難完了時点における実効熱伝達率[kW/m<sup>2</sup>K]  
 $K_{detect}$  : 煙感知器が作動する時点の減光係数[1/m]  
 $l_l$  : 付属室の各部分から付属室出入口に至るまでの歩行距離[m]  
 $l_{max}$  : 最大歩行距離[m]  
 $m_{e(escape)}$  : 避難完了時点の排煙量[kg/s]  
 $m_{e(sm)}$  : 排煙作動時点の排煙量[kg/s]  
 $m_p$  : 避難完了時点における火災プルーム流量[kg/s]  
 $Q_{detect}$  : 火災感知器が作動する時点の火源発熱速度[kW]  
 $Q_{f(escape)}$  : 避難完了時点の火源発熱速度[kW]  
 $Q_{f(sm)}$  : 排煙開始時点の火源発熱速度[kW]  
 $r$  : 火源から感知器までの水平距離[m]  
 $\Delta T_{detect}$  : 火災感知器が作動する時の天井流温度上昇[K]  
 $T_s$  : 避難完了時点の煙層温度[K]  
 $T_\infty$  : 周囲空気温度[K]  
 $t_{detect}$  : 火災感知器(第一報)が作動する時間[s]  
 $t_{check}$  : 付属室在館者が火災を確認するために歩行する時間[s]  
 $t_{escape}$  : 避難完了時間[s]  
 $t_{leak}$  : 基準室コア以外の部分または付属室で発生した煙が基準室コアに漏れ始める時間[s]  
 $t_{sm}$  : 排煙開始時間[s]  
 $t_{smoke}$  : 基準室全体に煙が拡散する時間[s]  
 $t_{start}$  : 避難開始時間[s]  
 $t_{travel}$  : 歩行時間[s]  
 $v$  : 歩行速度[m/s]  
 $z_c$  : 天井流の厚さ[m]  
 $Z_s$  : 避難完了時点における煙層下端高さ[m]  
 $Z_{(sm)}$  : 排煙開始時点における煙層下端高さ[m]  
 $\alpha_f + \alpha_m$  : 火災成長率[kW/s<sup>2</sup>](※告示に従う)  
 $\beta$  : 貸室に占める付属室床面積の割合[-]  
 $\rho_{escape}$  : 避難完了時点の煙層密度[kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho$  : 火災初期の煙層密度(=1.0)[kg/m<sup>3</sup>]