

# 排煙作動時の煙層下端高さの簡易予測式

間瀬 亮平 山口 純一

## Simple Equations for Predicting Smoke Layer Height with Smoke Exhaust System Actuation

Ryohei Mase Jun'ichi Yamaguchi

### Abstract

In evaluating the performance of evacuation safety at a building fire, the evacuation time is generally compared with the smoke filling time, or the smoke temperature and gas concentrations are compared with a reference value. The smoke filling time, etc. are often predicted using BRI2002 or a simple two-layer zone model. Further, simple equations have been proposed to predict the smoke layer height and smoke filling time. However, these simple equations are solved under the condition of no smoke exhaust system, so the effect of smoke exhaust system cannot be evaluated. On the other hand, equations taking account the smoke exhaust system require smoke exhaust system with a considerably higher performance than that is actually required. Hence, in this study, we have proposed improved simple equations for predicting the smoke layer height that can appropriately take into consideration the effect of the smoke exhaust system.

### 概要

建築物の火災時の避難安全性能の評価では、建築物の各部分における避難時間と煙層降下時間の大小を比較するか、煙層温度やガス濃度を避難安全上の基準値と比較するのが一般的である。火災時の煙層降下時間等の予測には、BRI2002や簡易二層ゾーンモデルがよく用いられる。また、火災室の煙層下端高さまたは煙層降下時間の予測に限れば、手計算レベルの簡易予測式が提案されている。しかし、これらの予測式は排煙設備の設置されない空間について解かれたものであり、排煙の効果を見込むことができない。一方で、排煙の効果を見込んだ予測式は、実際の必要量よりも過大な排煙量を要求するものとなっている。そこで本研究では、煙層降下時間の簡易予測式を改良し、排煙の効果を見込む簡易予測式の提案を行った。さらに、ケーススタディにより、本簡易予測式は既存予測手法と同等以上の高い予測精度が確保されていることを確認した。

## 1. はじめに

建築基準法では、建築物の火災時の安全性確保に対する要求として、1)仕様規定に適合させる方法(ルートA)、2)平成12年建設省告示第1441号、同第1442号(避難安全検証法)に定められた方法に従い避難安全性能の検証を行う方法(ルートB)、3)高度な計算等により検証を行い、国土交通大臣の認定を受ける方法(ルートC)のいずれかに適合することを求めている。

ルートBまたはCを用いて設計を行う場合、直通階段までの歩行距離制限、排煙設備の設置等の仕様規定を免除する代わりに、避難安全性能が確保されていることを検証する。Fig. 1に避難安全性能の評価のイメージを示す。

ルートBは平成12年建告第1441号に従った検証手法ではあるが、設計者が行政とのコミュニケーションツールとして使用することを目的としているため、その実用性を重視するあまり工学的な妥当性を犠牲にしている点がある。一方でルートCは、ルートBと比較してより自由度の高い設計が可能である。しかし、その評価手法も任意であるため、用いる評価手法の精度が低いと計算の各部分で安全率を見込む必要が生じ、建築物に過剰な安全性

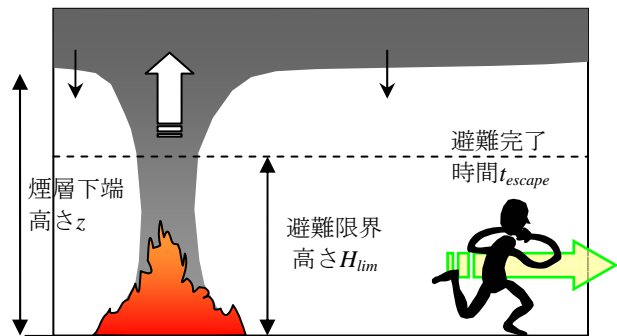


Fig. 1 避難安全性能の評価のイメージ  
An Image of Evacuation Safety Design

能を要求してしまう可能性がある。そのため、ルートCにより設計を行う際には、安全水準の高い設計とすることは勿論、より精度の高い評価手法を用いることが非常に重要となる。以降では、ルートC(高度な検証方法)で用いられる予測手法について述べる。

建築物の火災時の避難安全性能の評価では、煙層下端高さ(または煙層降下時間)の予測が柱の一つとして挙げられるが、その予測手法としては他に、BRI2002<sup>1)</sup>、簡易二層ゾーンモデル<sup>2)</sup>、簡易予測式<sup>3), 4)</sup>がよく用いら

Table 1 各予測手法の特徴  
Characteristics of the Prediction Methods

| 予測手法                             | 特徴   | 精度            | 排煙の効果 | 専門性 |
|----------------------------------|--|---------------|-------|-----|
| 二層ゾーンモデル (BRI2002) <sup>1)</sup> | 火災時における室内空間が上部煙層と下部空気層の二層に分かれるものと仮定し、両層及び火源、壁、天井等の間の熱のやり取り、各化学種の濃度等の計算を行うプログラム。火災室に複数の室が接続された空間についてもシミュレーションを行うことが可能である。                               | 非常に良い         | ○     | 必要  |
| 簡易二層ゾーンモデル <sup>2)</sup>         | 基本とする考え方はBRI2002と同じであるが、より簡易的に火源、煙層、壁面および天井間の熱のやり取りに注目し、煙層の下端高さや温度等を算出する計算モデル。下部空気層の熱収支は考慮しない。また、火災室のみについてしか計算ができない。                                   | BRI2002と同等    | ○     | 必要  |
| 簡易予測式 <sup>3), 4)</sup>          | 火災成長率、室面積、天井高さ等をパラメータとし、単一の計算式により火災室の煙層下端高さを算出する。火源、煙層、壁面および天井間のエネルギー保存をもとに解かれている。コミュニケーションツールとしての有用性も高い。  | 良い            | ×     | 不要  |
| 告示式 (H12年建告第1441号)               | 平成12年建設省告示第144号、同1442号に規定された、煙層が1.8mまで降下する時間を求める簡易計算式。使用に際し専門性を要しないが、式の単純化過程でいくつかの工学的矛盾を含んでおり、面積の小さい室に厳しい、煙層下端高さを求めたい時間を大きく設定すると危険側の結果となる傾向がある等の難点がある。 | 条件によって悪い場合がある | ○     | 不要  |

れる。Table 1に各予測手法の特徴を示す。

火災室における煙層降下時間の簡易予測式は田中らにより提案されている<sup>3), 4)</sup>が、このような簡易予測式の実務上のメリットとしては、建築的設計要素(空間の形状、開口寸法等)と煙降下時間との関係を定量的に把握できること、計算式および計算手順が示されているため火災安全設計の専門家でなくても理解し易く、建築確認申請などにおいて設計側と行政側とのコミュニケーションがとりやすいこと等が挙げられる。

しかし、これらの計算式は最も安全な場合を想定して室内に煙を排出する開口がなく、煙が天井から単純に降下する場合を想定して解かれたものである。一方、排煙の効果を見込んだ計算法<sup>2)</sup>も存在するが、実際の必要量よりも過大な排煙量が要求されるという問題がある。

そこで本研究では、煙層降下時間の簡易予測式<sup>3), 4)</sup>を改良し、排煙設備の効果精度良く見込める簡易予測式の提案を行った。さらに、簡易二層ゾーンモデル<sup>2)</sup>による予測結果と比較することで、その精度の検証を行った。

## 2. 煙層降下時間算定のための基本方程式

排煙設備作動時の煙性状を予測するためには少なくとも質量保存(式(1))およびエネルギー保存(式(2))の2式を連立して解く必要がある。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = m_p - m_e \quad (1)$$

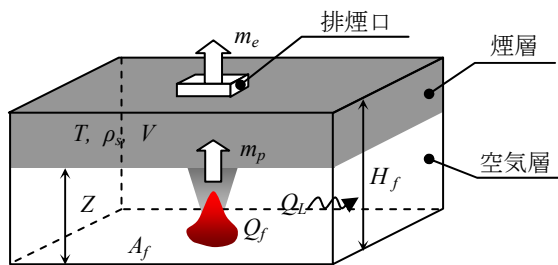


Fig. 2 計算室モデル  
Calculation Model

$$\frac{d}{dt} c_p \rho V T = Q_f - Q_L - c_p m_e T \quad (2)$$

ここに $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],  $V$  [m<sup>3</sup>],  $T$  [K]はそれぞれ、煙層の密度、体積、温度である。また、 $c_p$  [kJ/kg/K],  $m_p$  [kg/s],  $Q_f$  [kW],  $Q_L$  [kW]はそれぞれ、定圧比熱、煙層に貫入する火災ブルーム流量、火源発熱速度、熱伝達による壁面への失熱速度である。

しかし、式(1)および式(2)を解析的に解くことは不可能なので、ここでは煙層密度 $\rho$ を一定と見なして式(1)のみを用いることとする。

Fig. 2に示すように、室の天井高さが一定の場合を考えると、煙層体積は、火災室床面積 $A_f$  [m<sup>2</sup>], 天井高さ $H_f$  [m], 煙層下端高さ $z$  [m]を用いて、

$$V = A_f (H_f - z) \quad (3)$$

と表せる。したがって、式(1)は

$$-\rho A_f \frac{dz}{dt} = m_p - m_e \quad (4)$$

と変形できる。

ここで、煙層に貫入する火災ブルーム流量 $m_p$ は、Zukoskiのfar field model<sup>5)</sup>より、

$$m_p = C_m Q_f^{1/3} z^{5/3} \quad (5)$$

により与えられると仮定する。ただし $C_m$  [kg/kJ<sup>1/3</sup>/m<sup>5/3</sup>/s<sup>2/3</sup>]はブルームの巻き込み係数である。なお、煙層下端高さ $z$ は仮想点熱源からの高さとしなければならないが、簡略化のため、仮想点熱源を無視することとした<sup>4)</sup>。

次に、式(5)を式(4)に代入すると下式を得る。

$$-\rho A_f \frac{dz}{dt} = C_m Q_f^{1/3} z^{5/3} - m_e \quad (6)$$

ここで、実際は排煙量の分だけ煙層に貫入する正味の火災ブルーム流量が減少するが、本研究では巻き込み係数が小さくなると読み換え、

$$-\rho A_f \frac{dz}{dt} = (C_m - C_{sm}) Q_f^{1/3} z^{5/3} \quad (7)$$

と表されると考えた。ここで $C_{sm}$  [kg/kJ<sup>1/3</sup>/m<sup>5/3</sup>/s<sup>2/3</sup>]は、排煙により見かけ上減少する分の巻き込み係数であり、

$$C_{sm} \equiv \frac{m_e}{Q_f^{1/3} z^{5/3}} \quad (8)$$

と定義される。以降、 $C_{sm}$ を排煙係数と呼ぶ。すると式(7)は、

$$-\frac{dz}{z^{5/3}} = \frac{(C_m - C_{sm})Q_f^{1/3}}{\rho A_r} dt \quad (9)$$

と変形でき、解析的に解くことが可能となる。この式(9)が、本研究における煙層降下時間算定のための基本方程式である。

なお、排煙係数 $C_{sm}$ は、ある任意の時間における排煙量、発熱速度および煙層下端高さを用いて安全側に与えられるものと仮定して以降の議論を行うこととする。

### 3. 排煙設備作動時の煙層下端高さの簡易予測式の提案

建築物の火災安全設計では、設計火源として一般に次に示す(a)~(c)の3種類の火源が用いられる。Fig. 3にそれぞれの火源の時間と発熱速度との関係の概念図を示す。

(a) 定常火源 発熱速度が時間によらず一定の火源であり、式(10)により定義される。避難安全設計において使用されることは少ないが、耐火設計では一般的に用いられている。

$$Q_f = Q_c \quad (10)$$

(b) 成長火源 発熱速度が時間の2乗に比例して増加する火源で、最もよく用いられる設計火源であり、式(11)により定義される。 $\alpha[\text{kW/s}^2]$ は火災成長率と呼ばれ、可燃物の材料や密度に応じて0.0125~0.2の値を採る。

$$Q_f = \alpha t^2 \quad (11)$$

(c) 複合火源 発熱速度が火災初期は時間の2乗に比例して増加し、その後定常となる火源である。可燃物量が少ない室、スプリンクラーが設置されている室等において、可燃物の全表面が火炎に覆われた時点若しくはスプリンクラーが作動した時点において発熱速度がピークとなる火源を想定したものであり、式(12)により定義される。

$$Q_f = \begin{cases} \alpha t^2 & (t \leq t_c) \\ Q_c & (t > t_c) \end{cases} \quad (12)$$

以下では、(a)~(c)の火源ごとに、煙層下端高さの簡易予測式の提案を行う。なお、Fig. 2に示すような天井高さが一定の室を想定し、また、従来の排煙を考慮しない簡易予測式<sup>4)</sup>についても同時に整理を行った。

#### 3.1 定常火源における煙層下端高さ

3.1.1 排煙設備が設置されていない場合<sup>3)</sup> 任意の時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ および煙層下端高さが $z_0$ とな

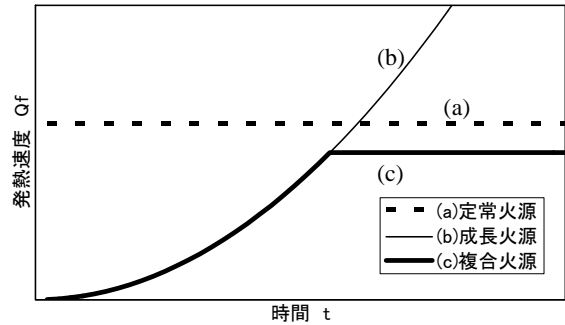


Fig. 3 設計火源モデル  
Designed Fire Source Model

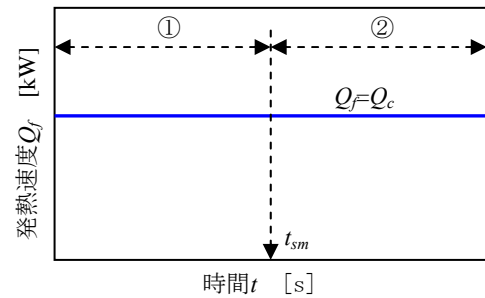


Fig. 4 排煙起動時間と発熱速度との関係 (定常火源)  
Relation between  $t_{sm}$  and  $Q_f$  (Constant Fire)

る時間 $t$ はそれぞれ下式のように提案されている。

$$z = \left( \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} t + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (13)$$

$$t = \frac{3\rho A_r}{2C_m Q_c^{1/3}} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_r^{2/3}} \right) \quad (14)$$

3.1.2 排煙設備が設置されている場合 排煙設備が設置されている場合は、排煙設備の起動前後で扱う方程式が異なるため、Fig. 4に示すように、排煙起動時間 $t_{sm}$ の前後で場合分けを行う。

排煙起動時間 $t_{sm}$ 以前 (Fig. 4における①の時間) における煙層下端高さ $z$ は式(13)により、煙層下端高さが $z_0$ となる時間 $t_0$ は式(14)により求められる。

次に、排煙起動時間 $t_{sm}$ 以降 (Fig. 4における②の時間) においては、排煙の効果が見込まれるため、式(10)を式(9)に代入し、さらに積分すると次式が得られる。

$$\frac{3}{2} (z^{-2/3} - z_0^{-2/3}) = \frac{(C_m - C_{sm})Q_c^{1/3}}{\rho A_r} (t - t_0) \quad (15)$$

ここで、排煙起動時間 $t_{sm}$ における煙層下端高さを $z_{sm}$ とすると、排煙起動時間 $t = t_{sm}$ においては $(t_0, z_0) = (t_{sm}, z_{sm})$ であるので、式(15)は

$$\frac{3}{2} (z^{-2/3} - z_{sm}^{-2/3}) = \frac{(C_m - C_{sm})Q_c^{1/3}}{\rho A_r} (t - t_{sm}) \quad (16)$$

と表すことができる。さらに式(16)を $z$ について整理すると、時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ の予測式は、

$$z = \left\{ \frac{2(C_m - C_{sm})Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_{sm}) + \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right\}^{-3/2} \quad (17)$$

と表せる。また、式(17)を時間 $t$ について整理すると、

$$t = \frac{3\rho A_r}{2Q_c^{1/3}(C_m - C_{sm})} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right) + t_{sm} \quad (18)$$

となる。

ここで、時間 $t_{sm}$ における煙層下端高さ $z_{sm}$ は、式(13)より式(19)のように書ける。

$$z_{sm} = \left( \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} t_{sm} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (19)$$

煙層高さ $z$ または煙層降下時間 $t$ は、式(17)または式(18)の $z_{sm}$ に式(19)により得られた値を代入することによって求めることができるが、実用上は以下に示す式を用いた方がよい。

式(17)に式(19)を代入すると、時間 $t$  (ただし $t_{sm} \leq t$ ) における煙層下端高さ $z$ は式(20)のように表すことができる。

$$z = \left[ \frac{2Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} \{ C_m t - C_{sm} (t - t_{sm}) \} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (20)$$

また、式(18)に式(19)を代入すると、煙層下端高さ $z$ となる時間 $t$ として、

$$t = \frac{3\rho A_r}{2Q_c^{1/3}(C_m - C_{sm})} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_r^{2/3}} \right) - \left( \frac{C_{sm}}{C_m - C_{sm}} \right) t_{sm} \quad (21)$$

が得られる。ただし、 $z \leq z_{sm}$ である。

### 3.2 成長火源における煙層下端高さ

3.2.1 排煙設備が設置されていない場合<sup>4)</sup> 排煙設備が設置されていない場合の時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ および煙層下端高さ $z$ となる時間 $t$ は、それぞれ次式のように提案されている。

$$z = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (22)$$

$$t = \left\{ \frac{5\rho A_r}{2C_m \alpha^{1/3}} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_r^{2/3}} \right) \right\}^{3/5} \quad (23)$$

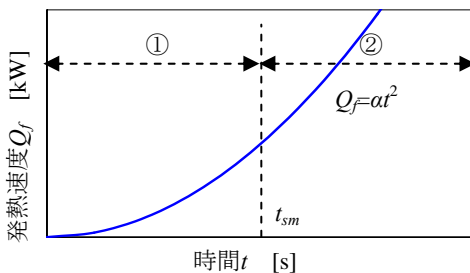


Fig. 5 排煙起動時間と発熱速度との関係(成長火源)  
Relation between  $t_{sm}$  and  $Q_f$  (t-square Fire)

3.2.2 排煙設備が設置されている場合 成長火源の場合においても、排煙の起動前後で扱う方程式が異なるため、Fig. 5に示すように場合分けを行う。

ここで、排煙起動時間を $t_{sm}$ とし、その時点における煙層下端高さ $z_{sm}$ とすると、 $t_{sm}$ 以前 (Fig. 5における①の時間) における煙層下端高さ $z$ は、式(22)により求められる。従って、 $z_{sm}$ は式(24)のように表せる。

$$z_{sm} = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t_{sm}^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (24)$$

次に、 $t_{sm}$ 以降 (Fig. 5における②の時間) においては、排煙の効果が見込まれるので、式(12)を式(9)に代入し、さらに積分すると次式が得られる。

$$\frac{3}{2} (z^{-2/3} - z_0^{-2/3}) = \frac{3(C_m - C_{sm}) \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} (t^{5/3} - t_0^{5/3}) \quad (25)$$

ここで、3.1.2項と同様に時間 $t=t_{sm}$ においては $(t_0, z_0)=(t_{sm}, z_{sm})$ であるので、式(25)は、

$$\frac{3}{2} (z^{-2/3} - z_{sm}^{-2/3}) = \frac{3(C_m - C_{sm}) \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} (t^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) \quad (26)$$

と表せる。さらに、 $z$ について整理すると、

$$z = \left\{ \frac{2(C_m - C_{sm}) \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} (t^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) + \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right\}^{-3/2} \quad (27)$$

となる。また、式(27)を時間 $t$ について整理すると、

$$t = \left\{ \frac{5\rho A_r}{2\alpha^{1/3}(C_m - C_{sm})} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right) + t_{sm}^{5/3} \right\}^{3/5} \quad (28)$$

を得る。

さらに、式(24)を式(27)に代入して $z_{sm}$ を消去すると、時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ は、式(29)のようにも表すことができる (ただし $t_{sm} \leq t$ )。

$$z = \left[ \frac{2\alpha^{1/3}}{5\rho A_r} \{ C_m t^{5/3} - C_{sm} (t^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) \} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (29)$$

同様に、煙層下端高さ $z$ となる時間 $t$ も、

$$t = \left\{ \frac{5\rho A_r}{2\alpha^{1/3}(C_m - C_{sm})} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_r^{2/3}} \right) - \frac{C_{sm}}{C_m - C_{sm}} t_{sm}^{5/3} \right\}^{3/5} \quad (30)$$

と表すことができる。ただし、 $z \leq z_{sm}$ である。

### 3.3 複合火源における煙層下端高さ

3.3.1 排煙設備が設置されていない場合<sup>5)</sup> 複合火源においては、火源が成長火源から定常火源へと移行する時間 $t_c$ の前後で場合分けを行う。

まず、時間が $t_c$ の場合は、3.2.1の項で述べたように、煙層下端高さ $z$ については式(21)、煙層降下時間 $t$ については式(24)を用いて求めればよい。

次に、時間 $t_c$ 以降については、煙層下端高さ $z$ は、式(31)により表される時間 $t_c$ における煙層下端高さ $H_c$ 。



$$H_c = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t_c^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (31)$$

を用いて、

$$z = \left( \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_c) + \frac{1}{H_c^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (32)$$

により算出するか、または $H_c$ を消去した、

$$z = \left[ \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} \left\{ t + \frac{3}{5} \left( \frac{\alpha}{Q_c} \right)^{1/3} t_c^{5/3} - t_c \right\} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (33)$$

により算出する。

煙層降下時間 $t$ は、 $H_c$ を用いる場合には、

$$t = \frac{3\rho A_r}{2C_m Q_c^{1/3}} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_c^{2/3}} \right) + t_c \quad (34)$$

であり、 $H_c$ を用いない場合は、

$$t = \frac{3\rho A_r}{2C_m Q_c^{1/3}} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_r^{2/3}} \right) - \frac{3}{5} \left( \frac{\alpha}{Q_c} \right)^{1/3} t_c^{5/3} + t_c \quad (35)$$

により得られる。ただし、式(34)および式(35)における $z$ は $z \leq H_c$ である。

**3.3.2 排煙設備が設置されている場合** ここでは、移行時間 $t_c$ 、排煙起動時間 $t_{sm}$ の大小関係によって場合分けを行う。移行時間 $t_c$ と排煙起動時間 $t_{sm}$ との関係は、Fig. 6 またはFig.7のいずれかとなる。

**3.3.2.1  $t_c \leq t_{sm}$ の場合** まず、 $t_c$ 以前 (Fig. 6における①の時間) においては、成長火源でかつ排煙設備も稼働していないので、3.2.1の項で述べた式(21)、または式(22)を用いばよい。また、 $t_c \leq t \leq t_{sm}$  (Fig. 6における②の時間) における煙層下端高さ $z$ は、排煙設備が設置されていない複合火源と同じなので、3.3.1で述べた式(32)もしくは式(33)を用いばよい。

次に、排煙起動時間 $t_{sm}$ 以降 (Fig. 6における③の時間) における予測式を提案する。

$t_{sm}$ 以降においては定常火源で排煙設備が作動した状態と同じであるため、煙層下端高さ $z$ は、3.1.2で述べたように、式(17)により表せる。再掲すると、

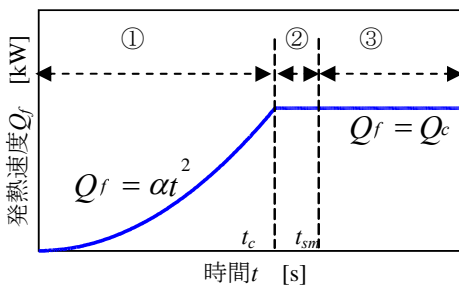


Fig. 6 火源移行時間と排煙起動時間との関係 ( $t_c \leq t_{sm}$ の場合)  
Relation between  $t_c$ ,  $t_{sm}$  and  $Q_f$

$$z = \left\{ \frac{2(C_m - C_{sm}) Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_{sm}) + \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right\}^{-3/2} \quad (17)$$

である。また、煙層降下時間 $t$ についても同様に式(18)により表すことができ、再掲すると、

$$t = \frac{3\rho A_r}{2Q_c^{1/3} (C_m - C_{sm})} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right) + t_{sm} \quad (18)$$

である。

ここで、 $t_{sm}$ における煙層下端高さ $z_{sm}$ は、排煙設備不作動時の複合火源と同じなので、式(33)より、

$$z_{sm} = \left[ \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} \left\{ t_{sm} + \frac{3}{5} \left( \frac{\alpha}{Q_c} \right)^{1/3} t_c^{5/3} - t_c \right\} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (36)$$

と表せる。

**3.3.2.2  $t_{sm} \leq t_c$ の場合** まず、 $t_{sm}$ 以前 (Fig. 7における①の時間) においては、成長火源でかつ排煙設備は不作動であるので、3.2.1で述べたように、式(21)または式(22)を用いばよい。また、 $t_{sm} \leq t \leq t_c$  (Fig. 7における②の時間) における煙層下端高さ $z$ は、排煙設備作動時の成長火源と同じなので、3.2.2項で述べたように、式(27)または式(29)を用いばよい。

次に、時間 $t_c$ 以降 (Fig. 7における③の時間) における予測式を提案する。

時間 $t_c$ 以降は、排煙設備作動時の定常火源と同じであるため、煙層下端高さ $z$ は、(15)において $(t_0, z_0) = (t_c, H_c)$ とすると、

$$z = \left\{ \frac{2(C_m - C_{sm}) Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_c) + \frac{1}{H_c^{2/3}} \right\}^{-3/2} \quad (37)$$

となり、同様に煙層降下時間 $t$ は、式(37)を $t$ について整理することで、

$$t = \frac{3\rho A_r}{2Q_c^{1/3} (C_m - C_{sm})} \left( \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_c^{2/3}} \right) + t_c \quad (38)$$

となる。ここに式(37)、式(38)中の $H'_c$ は、排煙作動時の時間 $t_c$ における煙層下端高さである。ここで $H'_c$ は、排煙作動時における成長火源の条件であるため、3.2.2で述べたように、

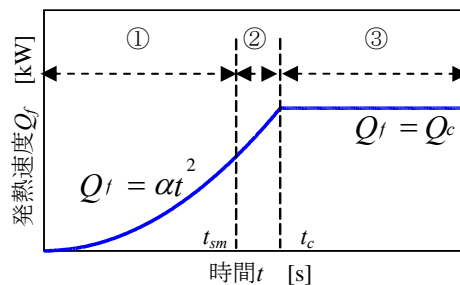


Fig. 7 火源移行時間と排煙起動時間との関係 ( $t_{sm} \leq t_c$ の場合)  
Relation between  $t_c$ ,  $t_{sm}$  and  $Q_f$

$$H'_c = \left[ \frac{2\alpha^{1/3}}{5\rho A_r} \left\{ C_m t_c^{5/3} - C_{sm} (t_c^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) \right\} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (39)$$

により表すことが出来る。

### 3.4 予測式のまとめ

Table 2に、各設計火源における煙層下端高さの簡易予測式を示す。

### 4. 計算手順

ここでは、本予測手法を用いる場合の、時間 $t$ における煙層下端高さの算出手順について述べる。なお、本研究では火源として定常火源、成長火源、複合火源を想定した予測式を提案したが、火災室からの避難を考える場合は主に初期火災が対象となるため、実務的には成長火源を想定するのが一般的である。そこで、以下では成長火

Table 2 煙層下端高さの簡易予測式  
Simple Equations for Predicting Smoke Layer Height

|                       |  |
|-----------------------|--|
| 定常火源                  | $z = \left( \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} t + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (t \leq t_{sm})$   |
|                       | $z = \left[ \frac{2Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} \{ C_m t - C_{sm} (t - t_{sm}) \} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (t_{sm} \leq t)$   |
| 成長火源                  | $z = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (t \leq t_{sm})$  |
|                       | $z = \left[ \frac{2\alpha^{1/3}}{5\rho A_r} \{ C_m t^{5/3} - C_{sm} (t^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) \} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (t_{sm} \leq t)$  |
| $t_c \leq t_{sm}$ の場合 | $z = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (t \leq t_c)$   |
|                       | $z = \left\{ \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_c) + \frac{1}{H_c^{2/3}} \right\}^{-3/2}$ ただし $H_c = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t_c^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2}$<br>または $z = \left[ \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} \left\{ t + \frac{3}{5} \left( \frac{\alpha}{Q_c} \right)^{1/3} t_c^{5/3} - t_c \right\} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (t_c \leq t \leq t_{sm})$ |
|                       | $z = \left\{ \frac{2(C_m - C_{sm}) Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_{sm}) + \frac{1}{z_{sm}^{2/3}} \right\}^{-3/2}$<br>ただし $z_{sm} = \left[ \frac{2C_m Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} \left\{ t_{sm} + \frac{3}{5} \left( \frac{\alpha}{Q_c} \right)^{1/3} t_c^{5/3} - t_c \right\} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (t_{sm} \leq t)$   |
| 複合火源                  | $z = \left( \frac{2C_m \alpha^{1/3}}{5\rho A_r} t^{5/3} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (t \leq t_{sm})$  |
|                       | $z = \left[ \frac{2\alpha^{1/3}}{5\rho A_r} \{ C_m t^{5/3} - C_{sm} (t^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) \} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (t_{sm} \leq t \leq t_c)$   |
|                       | $z = \left\{ \frac{2(C_m - C_{sm}) Q_c^{1/3}}{3\rho A_r} (t - t_c) + \frac{1}{H_c^{2/3}} \right\}^{-3/2}$<br>ただし $H'_c = \left[ \frac{2\alpha^{1/3}}{5\rho A_r} \{ C_m t_c^{5/3} - C_{sm} (t_c^{5/3} - t_{sm}^{5/3}) \} + \frac{1}{H_r^{2/3}} \right]^{-3/2} \quad (t_c \leq t)$   |

源を想定した場合について述べる。

本手法を用いて煙層下端高さ $z$ を求める際には、Fig. 8に示すように五段階の手順を踏む必要がある。以下にそれぞれの算出方法について述べる。

#### 4.1 対象空間の各パラメータの取得

火災空間の床面積 $A_r$ 、天井高さ $H_r$ 、火災成長率 $\alpha$ 、排煙条件（排煙方式、排煙風量）の取得を行う。

#### 4.2 排煙開始時間 $t_{sm}$ の算定（設定）

基本的には任意に設定可能であるが、在館者が排煙設備の起動ボタンを押す時間、もしくは火災感知器等と連動して排煙設備が作動する時間以降とする。

#### 4.3 時間 $t$ における煙層密度 $\rho$ の算定

既存の簡易予測式<sup>3),5)</sup>では、火災初期を対象とした予測式であるため、煙層密度は $1.0[\text{kg}/\text{m}^3]$ とすれば安全側の過程であるとされていたが、本予測式では排煙設備の設置された空間を対象としており、火災初期以降について適用されることが想定される。そこで本研究では、以下に示す方法により時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ を算定した。

1) 煙層密度 $\rho$  煙層を理想気体とみなし、気体の状態方程式より算出する。さらに既存手法との整合性をとるため、求めた $\rho$ と $1.0$ との小さい方を煙層密度 $\rho$ として採用し、式(40)により求める。

$$\rho = \min\left(\frac{353}{T_s}, 1.0\right) \quad (40)$$

2) 煙層温度 $T_s$  火災プルームによって煙層に供給される熱量は、煙層温度を初期温度 $T_\infty$ から $T_s$ に上昇させるために必要な熱量と、煙層から周壁に伝達される熱量に分配されると考えられる。従って、式(40)中の煙層温度 $T_s$  [K]は、式(41)より算定する。

$$T_s = T_\infty + Q_c / (C_p m_p + h_k A_w) \quad (41)$$

ここに $h_k[\text{kW}/\text{m}^2\text{K}]$ は周壁・天井の熱伝達率、 $A_w$  [ $\text{m}^2$ ]は煙層の接する天井の面積である。また、実効熱伝達率 $h_k$ は、McCaffrey等の提案式に加え上限値を設定し、式(44)

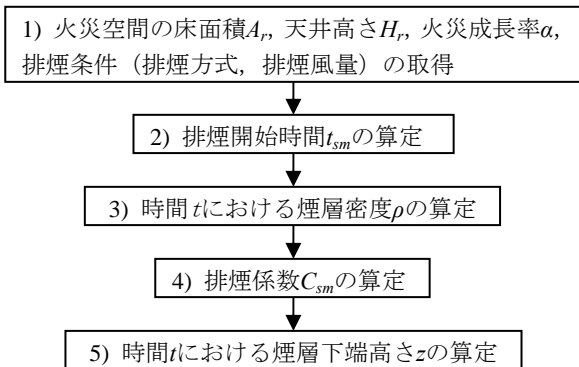


Fig. 8 本予測手法の手順  
Flow of Prediction Method

により算出する。

$$h_k = \min\left\{\sqrt{\lambda \rho_c c / t}, 0.015\right\} \quad (42)$$

3) 火災プルーム流量 $m_p$  式(41)中の火災プルーム流量 $m_p$ は、式(5)によって算定するが、煙層下端高さ $z$ は予め算出することは出来ないため、ここでは安全側の仮定として $z=H_{lim}[\text{m}]$ として安全側に仮定する。

$$m_p = C_m Q_f^{1/3} H_{lim}^{5/3} \quad (43)$$

#### 4.4 排煙係数 $C_{sm}$ の算定

排煙係数 $C_{sm}$ の算定法については、後述する「5. 排煙係数 $C_{sm}$ の算出方法」にて述べる。

#### 4.5 時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ の算定

4.1から4.4まで求めた各数値をTable 2に示した成長火源の式に代入することにより、時間 $t$ における煙層下端高さ $z$ を算出する。

### 5. 排煙係数 $C_{sm}$ の算出方法

#### 5.1 算出方法の考え方

排煙係数 $C_{sm}$ は時々刻々と変化するが、本手法では排煙係数は安全側に、かつ高い実用性を持つように定数として与えることを考える。

排煙係数 $C_{sm}$ は、式(8)で定義したように、発熱速度 $Q_f$ 、煙層下端高さ $z$ 、および有効排煙量 $m_e$ の関数として与えられる。ここでは、 $C_{sm}$ と $Q_f$ 、 $z$ および $m_e$ の関係について、はじめに考察する。

(1) 火源発熱速度 $Q_f$  発熱速度 $Q_f$ は、時間の経過とともに増加する。よって、火源発熱速度は大きめに見積もれば安全側の設定となる。

(2) 煙層下端高さ $z$  煙層下端高さ $z$ は、法定風量の数倍以上の排煙量を確保しない限り時間の経過とともに低くなると考えられる。よって、煙層下端高さ $z$ は小さく見積もれば安全側の設定となる。

(3) 有効排煙量 $m_e$  有効排煙量 $m_e$ は、排煙方式、煙層温度、煙層下端高さに応じて異なる。しかし火災初期や排煙開始直後においては一般的に煙層温度が高くなるほど、または煙層下端高さが低くなるほど（煙層が厚いほど）有効排煙量は大きくなる。従って、煙層温度と煙層厚さが時間の経過とともに大きくなるので、有効排煙量 $m_e$ も時間とともに大きくなる。よって、有効排煙量 $m_e$ は排煙開始時における有効排煙量 $m_{e,sm}$ をとれば最も安全側の設定となる。

避難安全設計では、別途避難時間 $t_{escape}$ が与えられるので、 $C_{sm}$ の算出にあたっては $t_{sm}$ から $t_{escape}$ までについて考えれば良い。

以上(1)~(3)の検討結果より、 $t_{sm}$ 、 $t_{escape}$ における各パラメータの関係は、Fig. 9に示すように二つに大別することが出来る。そこで、本研究では、Fig. 9に示す排煙開始時点における排煙係数（ $C_{sm1}$ ）および避難完了時点に

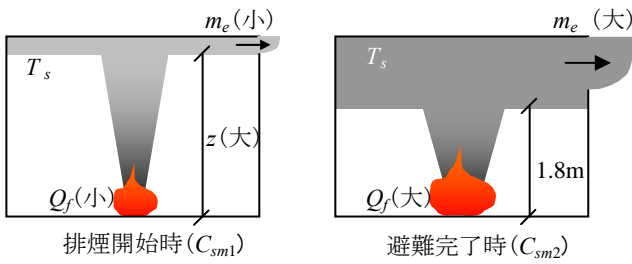


Fig. 9 各パラメータと排煙係数との関係  
Relation of Each Parameters and  $C_{sm}$

における排煙係数 ( $C_{sm2}$ ) を想定することとした。

$$C_{sm1} = \frac{m_{e,sm}}{Q_{f,sm}^{1/3} z_{sm}^{5/3}} \quad (44)$$

$$C_{sm2} = \frac{m_{e,escape}}{Q_{f,escape}^{1/3} z_{escape}^{5/3}} \quad (45)$$

ここに  $m_{e,sm}$ ,  $Q_{f,sm}$ ,  $z_{sm}$  は排煙開始時における有効排煙量, 発熱速度, 煙層下端高さ,  $m_{e,escape}$ ,  $Q_{f,escape}$ ,  $z_{escape}$  は避難完了時における有効排煙量, 発熱速度, 煙層下端高さである。

なお, 式(45)の  $z_{escape}$  は予め算出できないので,  $z_{escape}$  については避難安全性の評価において想定する下限値である, 避難限界高さ  $H_{lim}$  として与えることとする。即ち, 式(46)により与える。

$$C_{sm2} = \frac{m_{e,escape}}{Q_{f,escape}^{1/3} H_{lim}^{5/3}} \quad (46)$$

また, 最も安全側の想定として, 式(44)における  $z_{sm}$  を室の天井高さ  $H_r$  と置き換えたものを  $C_{sm3}$  として与える。

$$C_{sm3} = \frac{m_{e,sm}}{Q_{f,sm}^{1/3} H_r^{5/3}} \quad (47)$$

## 5.2 排煙係数 $C_{sm}$ の算出

上記の排煙係数を算出するためには,  $Q_{f,sm}$ ,  $Q_{f,escape}$ ,  $z_{sm}$ ,  $m_{e,sm}$ ,  $m_{e,escape}$  を算出する必要がある。これらの算出法としては様々なものが考えられるが, ここではその算出法の一例を示す。

5.2.1 火源発熱速度  $Q_{f,sm}$ ,  $Q_{f,escape}$  排煙起動時および避難完了時における成長火源の発熱速度  $Q_{f,sm}$  は, 式(11)により定義する。

5.2.2 排煙起動時における煙層下端高さ  $z_{sm}$  排煙起動時における煙層下端高さ  $z_{sm}$  は, 既存簡易予測式に従い, 式(23)によって算出する。

5.2.3 有効排煙量  $m_{e,sm}$ ,  $m_{e,escape}$  ここでは, 一例として機械排煙を想定した場合の, 有効排煙量  $m_{e,sm}$  の算出式<sup>2)</sup>を示す。

$$m_e = \min \left[ \left( \frac{1.33^2 g \rho_\infty^2 T_\infty \Delta T_s}{T_s^2 M_E^2} \right)^{1/5} (H_e - z), 1 \right] \times \rho_s M_E \quad (48)$$

ここに  $g[\text{m/s}^2]$  は重力加速度,  $\rho_\infty[\text{kg/m}^3]$  は周囲空気密度,  $T_\infty$  は雰囲気温度,  $\rho_s[\text{kg/m}^3]$  は煙層密度,  $T_s[\text{K}]$  は煙層温度,  $M_E[\text{m}^3/\text{s}]$  は排煙機の排煙風量,  $H_e[\text{m}]$  は床面から排煙口中心部までの高さである。式(48)中の煙層密度  $\rho_s$  については, 4.3項と同様の方法により, それぞれの時間における煙層密度  $\rho_{sm}$  および  $\rho_{escape}$  として与える。

## 5.3 排煙係数 $C_{sm}$ の算出法に関するケーススタディ

5.3.1 計算条件 本ケーススタディの条件をTable 3に示す。ケーススタディは, 成長火源を想定し, 火災成長率  $\alpha$  を0.0125, 0.1, 0.2と変化させた3つの条件のもとで行った。避難完了時間  $t_{escape}$  については, 一辺が  $\sqrt{A_r}[\text{m}]$  の正方形の平面で, その隅角部に有効幅0.9[m]の扉を一箇所持つ室を想定し, 建告第1441号の計算式により算出した時間である,  $t_{escape} = 5\sqrt{A_r}$  として与えた。また, 排煙起動時間  $t_{sm}$  については, 排煙機の起動スイッチは避難扉付近に設置されていると考え, 避難を開始し扉の前に至るまでの時間を想定し,  $t_{sm} = 4\sqrt{A_r}$  により与えた。更に,  $t_{sm}$  の設定の仕方による計算結果への影響を見るために, 避難開始と同時に起動スイッチが押されるものと想定した時間である,  $t_{sm} = 2\sqrt{A_r}$  とした場合の結果も同時に示した。

5.3.2 ケーススタディの結果 結果の一例として, Fig. 10~13に, 火災成長率  $\alpha$  を0.0125と0.2, 天井高さを2.5と4.0とした条件で, 室面積をパラメータとして変化させたグラフを示す。

各グラフは, 横軸が室面積, 縦軸が避難完了時における煙層下端高さを本手法により求めた場合の算定値  $z$  の, 簡易二層ゾーンモデルにより求めた場合の算定値  $z_{cal}$  との比 ( $z/z_{cal}$ ) である。即ち, 縦軸の値が1に近いほど予測精度が高く, また, 1を下回れば簡易二層ゾーンモデルよりも安全側の結果を算出することを意味する。

Fig. 10~13を見ると, いずれのグラフにおいても  $C_{sm1}$  は簡易二層ゾーンモデルと比較して安全側の結果を示し, かつ  $C_{sm3}$  よりも高い精度を示している。また, 火災成長率が大きいほど全体的に安全側の結果となる傾向を示している。さらに, 全体的に  $t_{sm} = 4\sqrt{A_r}$  とした場合の方が,  $t_{sm} = 2\sqrt{A_r}$  とした場合よりも精度が高い。

以上より, 本研究では, 排煙係数  $C_{sm}$  の算出式として式(46)を採用することとした。

Table 3 計算条件 (簡易二層ゾーンモデルとの比較)  
Calculation Conditions  
(Comparison with Simple Two-Layer Zone Model)

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 火災成長率 $\alpha$ [ $\text{kW/s}^2$ ]         | 0.0125, 0.1, 0.2              |
| 室面積 $A_r$ [ $\text{m}^2$ ]                 | 50, 100, 200, 500, 1000, 1500 |
| 天井高さ $H_r$ [ $\text{m}$ ]                  | 2.5, 4.0                      |
| 排煙量 [ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ ] | 1.0                           |
| 避難完了時間 $t_{escape}$ [ $\text{s}$ ]         | $5\sqrt{A_r}$                 |
| 排煙起動時間 $t_{sm}$ [ $\text{s}$ ]             | $2\sqrt{A_r}$ , $4\sqrt{A_r}$ |



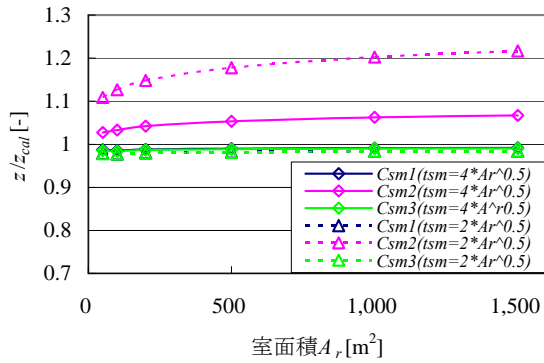


Fig. 10 排煙係数の比較( $\alpha=0.0125$ ,  $H=2.5$ )  
Comparison of  $C_{sm}$  ( $\alpha=0.0125$ ,  $H=2.5$ )

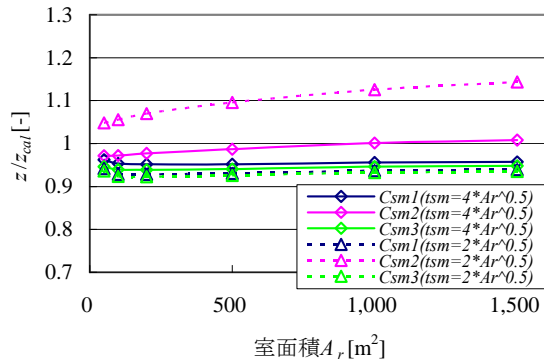


Fig. 11 排煙係数の比較( $\alpha=0.2$ ,  $H=2.5$ )  
Comparison of  $C_{sm}$  ( $\alpha=0.2$ ,  $H=2.5$ )

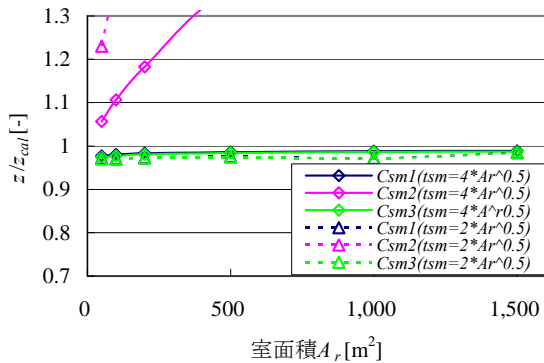


Fig. 12 排煙係数の比較( $\alpha=0.0125$ ,  $H=4.0$ )  
Comparison of  $C_{sm}$  ( $\alpha=0.0125$ ,  $H=4.0$ )

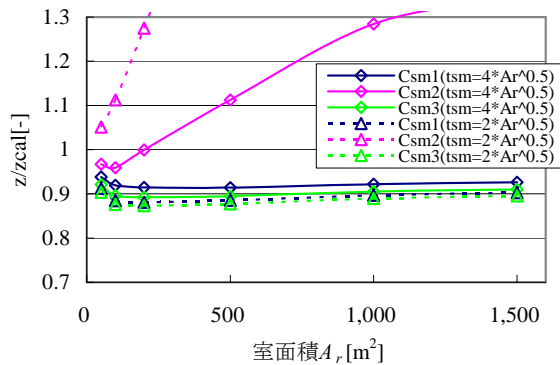


Fig. 13 排煙係数の比較( $\alpha=0.2$ ,  $H=4.0$ )  
Comparison of  $C_{sm}$  ( $\alpha=0.2$ ,  $H=4.0$ )

## 6. 簡易二層ゾーンモデルとの比較

### 6.1 ケーススタディ概要

本提案式の妥当性を検証するため、Table 4に示す条件の室において、4. 項と同様に成長火源を想定し、簡易二層ゾーンモデルならびに告示第1441号の計算式による計算結果との比較を行った。

本予測式は「4. 計算手順」の項の方法に則って計算した。また、告示式は煙層下端が限界煙層高さである1.8mまで降下する時間を求める式であるが、式中の限界煙層高さ $H_{lim}$ をその都度設定高さに読み替えることにより、煙層がある高さまで降下する時間を設定高さ毎に求めてプロットした。

### 6.2 結果の比較と考察

行ったケーススタディの中から、特徴的な四つのパターンについて、その結果をFig. 14 a)~d)に示す。

Fig. 14 a)に、 $A_r=100$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $CH=2.5$ ,  $M_E=0.5$ とした場合のグラフを示す。本条件は室面積および火災成長率が大きいのに対し排煙風量が小さく、排煙設備の効果が小さい条件である。本予測式は簡易二層ゾーンモデルの結果と非常に良い一致を見せている。また告示による結果は初期段階において過剰に安全側の結果を算出している。

Fig. 14 b)に、 $A_r=1500$ ,  $\alpha=0.125$ ,  $CH=2.5$ ,  $M_E=0.5$ とした場合のグラフを示す。本条件は室面積が大きいのに対し、火災成長率および排煙量が小さく、排煙設備の効果が非常に高い条件である。排煙起動時間は約155秒であり、排煙係数もその時間における有効排煙量等より算出しているため、本条件のような煙層の降下が遅い条件では、時間が経つにつれ本予測式の結果と簡易二層ゾーンモデルの結果との乖離が大きくなっていく。しかし、常に安全側の結果であり、告示式のように約400秒を境に簡易二層ゾーンモデルと逆転し、危険側の結果を算出するという現象は見られない。

Fig. 14 c)に、 $A_r=1500$ ,  $\alpha=0.125$ ,  $CH=2.5$ ,  $M_E=1.0$ とした場合のグラフを示す。本条件はFig. 15の条件より、さらに排煙風量が大きい条件である。比較のため $M_E=0.5$ の条件での結果も併せて示している。本予測式では、簡易二層ゾーンモデルと同様に、排煙風量が増加した効果を適切に反映できていることが分かる。しかし、告示式は形成される煙層が薄いため排煙効率が上がらず、排煙風量が増加した効果を反映できていない。

Table 4 計算条件 (ケーススタディ)

| Calculation Conditions (Case Study)              |               |
|--|---------------|
| 火災成長速度 $\alpha$ [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]       | 0.0125~0.2    |
| 室面積 $A_r$ [ $\text{m}^2$ ]                       | 100~1,500     |
| 天井高さ $H_r$ [m]                                   | 2.5~4.0       |
| 排煙量 $M_E$ [ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ ] | 0~1.0         |
| 排煙起動時間 $t_{sm}$ [s]                              | $4\sqrt{A_r}$ |

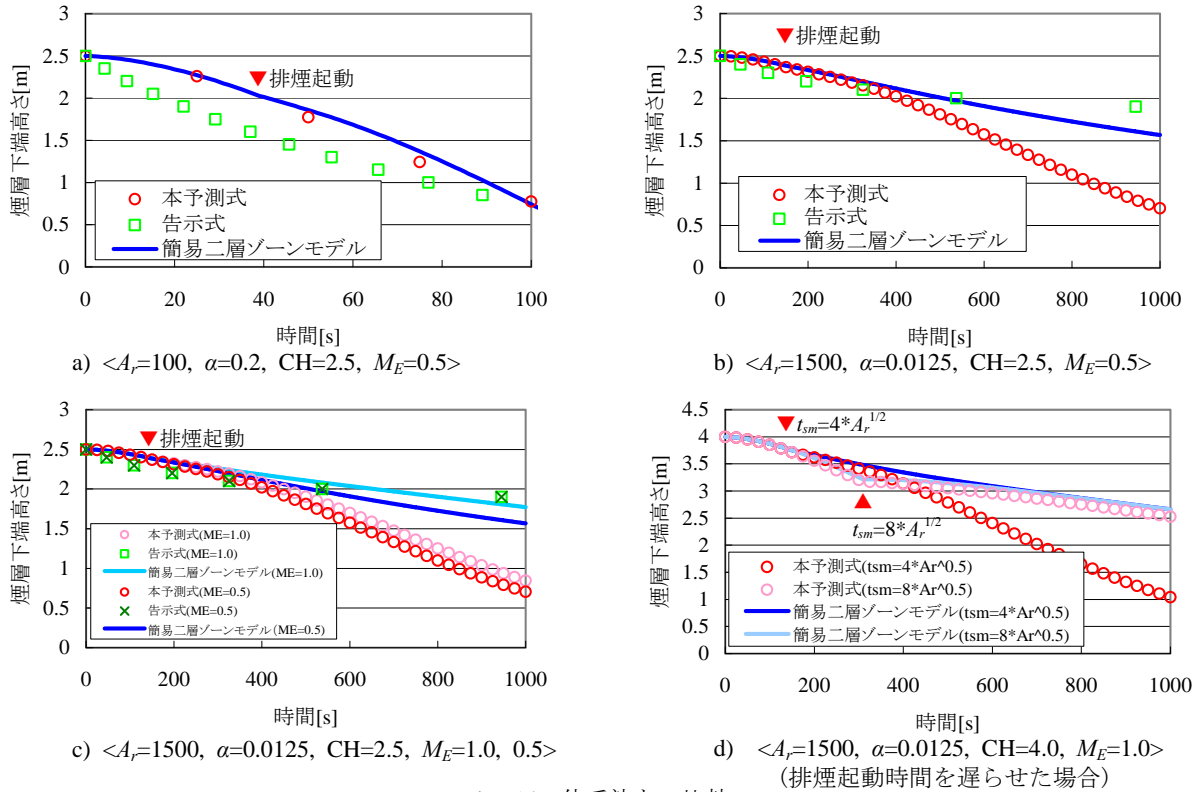


Fig. 14 他手法との比較  
Comparison with Other Methods

Fig. 14 d)に、 $A_r=1500, \alpha=0.125, CH=4.0, M_E=1.0$ とした場合のグラフを示す。このグラフでは、排煙の起動が遅れた場合の本予測式の精度を見るため、Fig. 14 a)~c)と同様に、排煙起動時間を  $t_{sm} = 4\sqrt{A_r}$  とした場合に加え、 $t_{sm} = 8\sqrt{A_r}$  とした場合の結果も示した。また、 $C_{sm}$ には上限として  $C_m$  と同じ0.076を与えて計算を行った。Fig. 14 d)より、本予測式では排煙の起動が遅れた場合でも、簡易二層ゾーンモデルよりも安全側に排煙作動時の煙層下端高さを予測できることが分かる。また、排煙の起動を遅らせることにより、計算後期での精度の向上が見られる。

### 6.3 ケーススタディのまとめ

Table 4に示すような一般的な条件下においては、本予測式では簡易二層ゾーンモデルよりも安全側に排煙作動時の煙層下端高さを算出できることを確認した。しかし、排煙の効果の大きい条件下においては時間の経過につれて安全側の結果を示す傾向がある。これは排煙係数の小さくなる初期段階(時間 $t_{sm}$ )において排煙係数を算出しているためである。また、排煙の効果の大きい条件では、排煙起動時間を遅らせると計算後期の精度は向上するが、排煙起動時間を遅らせすぎると実用性に難が生じる。この点の改良については今後の課題である。

## 7. まとめ

異なるタイプの火源(定常火源, 成長火源, 複合火源)に適用可能な排煙作動時の煙層下端高さの簡易予測式を

提案した。また、排煙係数 $C_{sm}$ の決定法について検討を行い、排煙起動時における有効排煙量、火源発熱速度および煙層下端高さを用いて算出すれば良いことを確認した。

さらに本簡易予測式の精度を検証するため、簡易二層ゾーンモデルの計算手法および平成12年建告第1441号による計算結果との比較を行った。その結果、一般的な条件の空間においては、本予測式を用いれば、簡易二層ゾーンモデルの計算手法により求めた煙層下端高さよりも安全側に、排煙作動時の煙層下端高さを予測できることを確認した。

### 参考文献

- 1) BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム, 社団法人建築研究振興協会, 2003
- 2) 久次米真美子, 田中哮義: 必要排煙量に基づいた居室避難安全評価手法, 日本建築学会環境系論文 第586号, pp. 1-8, 2004
- 3) 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
- 4) 山口純一, 田中哮義: 初期火災時における煙層下端高さの簡易予測式, 日本建築学会環境系論文集 第581号, pp. 1-8, 2004
- 5) Zukoski, E.E., Kubota, T. and Cetegen, B.: Entrainment in Fire Plume, Fire Safety Journal, vol.3, pp. 107-121, 1980/1981