

火災初期の煙拡散性状予測手法の開発

山口 純一 村岡 宏

Method to Predict Smoke Diffusion Behavior in the Early Stage of a Fire

Junichi Yamaguchi Ko Muraoka

Abstract

In this study, we developed a method for predicting smoke diffusion behavior in the early stage of a fire. Using this method, we can estimate the time when evacuation procedures should be initiated on the basis of visual inspection of the room where the fire occurs. Our findings are as follows: 1) The ceiling jet of hot gas from the fire source diffuses with the entrainment of fresh air. 2) The thickness of the ceiling jet ranges from 10% to 30% of the ceiling height. 3) The mass flow rate of the ceiling jet can be modeled into a vertical plume. 4) The smoke diffusion time can be calculated by using the average thickness of the ceiling jet and the corrected flow distance. 5) Our prediction method for smoke diffusion time can be applied to both steady fires and growing fires.

概要

本研究は、空間の視認性を考慮した避難開始時間算定に必要な火災初期の煙拡散性状を予測する手法を開発することを目的として行った。その結果、以下の知見を得た。(1)天井流は新鮮空気を巻き込みながら拡散する。(2)天井流の厚さは天井高さの1~3割である。(3)天井流の巻き込み量は従来の火災プルームと同様にモデル化できる。(4)煙拡散時間は、天井流平均厚さと補正流動距離を用いて算出できる。(5)煙拡散時間の予測式は、定常火源と成長火源ともに適用できる。

1. はじめに

建築火災時の建物利用者（以後、在館者）の安全性を確保するため、建築物の設計時に避難行動予測や煙性状予測を行い、避難が完了するまでの間、建築の各避難経路において煙層温度やガス濃度を避難安全上の基準値を満足することを確認する。この様な工学的手法を用いることで、避難経路の安全性を確保しつつ、排煙設備や防火区画の合理化が可能となる。

建築火災時の避難安全性評価は、各室毎に空間構成等を考慮して実施する。従って、安全性の評価後に間仕切壁の設置や室用途の変更を行う場合は、変更の度に安全性を再評価することが必要となる。そのため、避難安全性評価のツールとして用いる各種予測モデルは、予測精度が高く、計算結果がすぐに得られ、かつ高度な専門知識を持たない設計者等が使用できるものが望まれている。

避難安全性に大きな影響を与える要因として火災が発生してから在館者が避難を開始するまでに要する時間（以後、避難開始時間）が挙げられる。避難開始時間は、避難安全検証法（平成12年建告第1441号）においては、火災室床面積 A_f [m^2]を用いて、

$$t_{\text{start}} = 2\sqrt{A_f} \quad (1)$$

により与えることとしている。しかし、適用範囲（複雑な室形状の取り扱い）や避難シナリオ（どのような状態にな

ると火災覚知するのか）が明確でないという問題がある。例えば、平面形状がL字やコの字の室で火災が発生した場合、室の端部にいる在館者は室全体を見渡すことが難しく、よってこの在館者が火災覚知して避難開始するためには、少なくとも在館者から視認可能な位置まで煙が拡散していることが必要である。

そこで本論文は、空間の視認性を考慮した避難開始時間算定に必要な、火災初期の煙拡散性状を予測する簡易予測式を導出することを目的として行った。

2. 煙拡散性状予測式の導出

火災が発生した直後の煙は天井流と呼ばれ、Fig. 1に示すように天井面下を水平に流動する熱気流が形成される。しかし、煙性状予測ツールとして一般に用いられている二層ゾーンモデル¹⁾はこのような天井流の形成過程が考慮されていないため、空間の視認性を考慮した避難開始時間の予測手法としての利用は難しい (Fig. 2参照)。そこで、以下では火災初期の天井流の拡散性状を予測するための簡易式を提案する。

2.1 設計火源

一般的に避難安全設計で想定火源として使用される下式にならない火源発熱速度を与える²⁾。

$$Q_f = Q_0 t^n \quad (2)$$

ここで、 Q_f は火源発熱速度[kW]、 Q_0 は火災成長率[kW/sⁿ]、 t は時間[s]、 n は時間に対するべき乗数である。

2.2 天井流拡散性状の基礎方程式

煙拡散性状の予測には、煙層の質量収支と熱エネルギー収支が関係するが、火災発生後の初期の段階では煙層の温度上昇は小さいと考えられるので、煙層温度を一定と見なし、質量収支のみを用いて煙拡散面積が A_s [m²]となる時間 t_s [s] (以後、煙拡散時間と言う) の予測式を導出する。

天井流への気体の出入りは熱気流の上昇過程と水平伝播過程における空気の巻き込みによって生じる。この時、天井流の質量保存式は、煙層の密度 ρ [kg/m³]を一定と仮定し、体積を V [m³]を用いて

$$\rho \frac{dV}{dt} = m_p \quad (3)$$

となる²⁾。ここで、 m_p は火災プルームの流量[kg/s]である。

2.3 天井流の巻き込み性状

従来の煙性状予測モデル (例えば、BRI2002¹⁾) では、熱気流の上昇過程の巻き込みのみを考慮し、天井流の下面および先端部での巻き込みを無視して計算している。即ち、天井流に供給される火災プルームの流量は、火災プルームの巻き込み係数 k_m (=0.069) [kg/kJ^{1/3}・m^{5/3}・s^{2/3}]、天井高さ H_f [m]、火源発熱速度 Q_f [kW]を用いて、

$$m_p = k_m Q_f^{1/3} H_f^{5/3} \quad (4)$$

により与えるのが一般的である²⁾。なお、天井高さ H_f に対して天井流の流動距離 r [m]が小さい空間であればこの仮定が成り立つと考えられる。

天井流の下面および先端部での巻き込みが無視できない場合は、火災プルームの空気の巻き込みに加えて、天井流の下面において空気の巻き込みが生じる (Fig. 4参照)。そこで、天井流の下面の空気の巻き込みを火災プルームの巻き込みと同様に扱えると仮定し、水平方向の流動に対する巻き込み量の補正を補正流動距離 R [m]として天井高さ H_f [m]に加算することにより火災プルーム流量 m_p を補正し式(5)により与える。なお、補正流動距離 R [m]は流動距離 r [m]に依存すると考えられるが、以降の展開においては一定と扱う。

$$m_p = k_m Q_f^{1/3} (H_f + R)^{5/3} \quad (5)$$

天井が水平である場合、煙層の体積 V [m³]は、天井流の厚さ Z_s [m]を用いて、

$$V = A_s Z_s \quad (6)$$

となるので、式(2)の左辺は

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho Z_s \frac{dA_s}{dt} \quad (7)$$

と変形できる。式(7)を式(3)の左辺に代入し、式(5)の関係

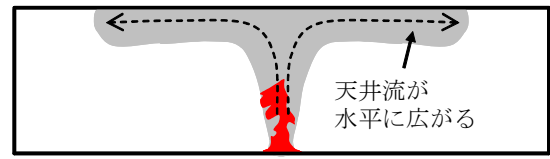


Fig. 1 火災初期の煙流動性状
Smoke Behavior in early Stage of Fire

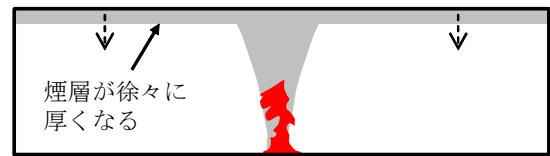


Fig. 2 二層ゾーンモデルの概念図
Conceptual Scheme of Two-Layer Zone Model

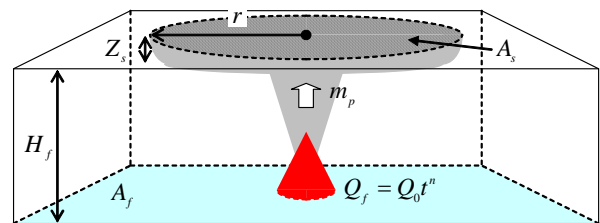


Fig.3 煙拡散性状簡易予測モデルの概念図
Conceptual Scheme of Simple Prediction model for
Smoke Behavior

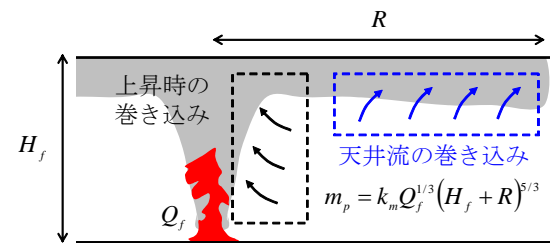


Fig. 4 天井流の巻き込み
Entrainment of Ceiling Jet

を用いることにより、

$$\rho Z_s \frac{dA_s}{dt} = k_m Q_f^{1/3} (H_f + R)^{5/3} \quad (8)$$

が得られる。さらに、式(2)を式(8)に代入すると

$$dA_s = \frac{k_m Q_0^{1/3} (H_f + R)^{5/3}}{\rho Z_s} t^{n/3} dt \quad (9)$$

となる。ここで、天井流の厚さ Z_s [m]は天井高さ H_f [m]および流動距離 r [m]の関数として表されるが³⁾、計算を簡単にするため、天井流の平均厚さ \bar{Z}_s [m]で代替する。すると、式(9)は積分可能となり、煙拡散面積が A_s [m²]となる煙拡散時間 t_s [s]の予測式を得る。

$$t_s = \left\{ (1+n/3) \cdot \frac{\rho \bar{Z}_s}{k_m Q_0^{1/3} (H_f + R)^{5/3}} \cdot A_s \right\}^{\left(\frac{1}{1+n/3} \right)} \quad (10)$$

3. 妥当性の検証

煙拡散性状の簡易予測式を検証するために、側壁の存在しない無限天井空間にて火災実験を行った。なお、種々の火源での予測式の適用性を検討するために、定常火源($n=0$)および成長火源($n=2$)を用いて実験を行った。

3.1 実験装置

実験に使用した天井の大きさは8.5m(W)×5.8m(L)で、床面から3mの高さに水平に設置した。この天井は厚さ12mmの合板下地に9.5mmの石膏ボードで構成されている。本実験では天井流の基本的な性状を把握することを目的としていることから、実験装置の側面に壁は設置していない。また、この実験装置は28.8m(W)×17.1m(L)×11.1m(H)の吹抜空間の中に設置した。Fig. 5は、天井面下における温度測定点の配置と火源位置の関係を示したものである。

3.2 測定項目

3.2.1 温度 素線径0.2mmのK型熱電対を天井面から鉛直下方に5cmの高さの水平面上に、格子状に45点設置した。ここで本論文においては、Fig. 5の座標 $x=a, y=b$ の位置を意味する場合は $(x, y)=(a, b)$ と表現する。また、定常火源($n=0$)を用いた実験については、 $(x, y)=(5, 3), (7, 3)$ および $(9, 3)$ の位置に垂直温度分布を測定するための熱電対を天井面から下方に100mm間隔で9点ずつ合計27点設置した。温度はデータロガーを介して1秒間隔で測定した。

3.2.2 燃料の重量減少速度 火源の発熱速度を把握するために燃料の重量減少を重量計（ザルトリウス社製、LP64401S）を用いて測定した。火源発熱速度は燃料の重量減少速度とその理論発熱量から算出した。秤量天板の保護板として厚さ0.6m×0.6m×0.05mのケイ酸カルシウム板を設置して、その上に燃料を設置した。

3.3 実験条件

3.3.1 天井高さ 高さ調節機構の付いた仮設ステージに火源を設置することによって、火源から天井までの高さを0.94, 1.6, 2.2, 2.8mの4段階に変化させた。なお、天井高さ2.8mについては仮設ステージを設けず、床面に火源を設置している。

3.3.2 火源 実験は時間のべき乗数 n および火源の火災成長係数 Q_0 を変えて実施した。べき乗数は $n=0, 2$ の2タイプを想定して行った。火源位置は何れのケースにおいてもFig. 5の $(x, y)=(3, 3)$ とした。

(1)定常火源($n=0$) 燃料にはメタノールを用い、ステンレス製の燃料火皿（円形）の直径を変えることで発熱速度を調節した。燃料火皿はいずれも深さ4cmのものを使用し、

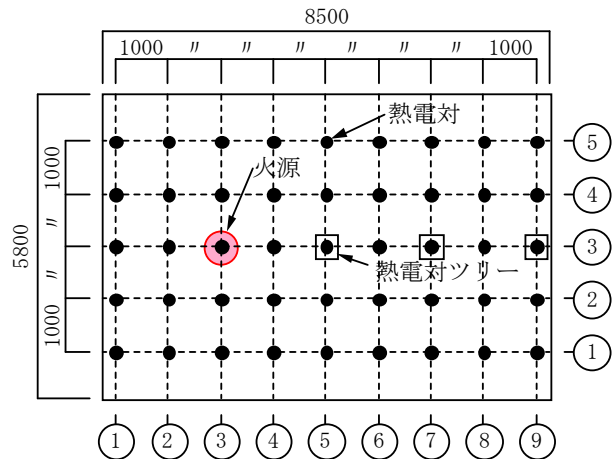


Fig. 5 温度の測定位置（平面図）
Measurement Positions of Temperature (Plan View)

Table 1 実験条件
Experimental Condition

火源モデル	時間 t のべき乗数 n	燃料	天井高さ H_f [m] ※1	火災成長係数 Q_0 [kW/s ⁿ]	実験No.
$Q=Q_0$	0	メタノール	0.94	8.2	0-1
				21	0-2
				40	0-3
			1.6	8.2	0-4
				40	0-5
				94	0-6
			2.2	8.2	0-7
				40	0-8
				91	0-9
			2.8	8.2	0-10
				39	0-11
				91	0-12
$Q=Q_0 t^2$	2	エタノール	1.6	0.012	2-1
				0.022	2-2
				0.040	2-3
				0.067	2-4
			2.8	0.012	2-5
				0.025	2-6
				0.043	2-7
				0.057	2-8
		木材	1.6	0.001	2-9
			2.7	0.002	2-10
				0.003	2-11

※1 火源設置床面からの天井高さ

直径0.2, 0.3, 0.4, 0.6mの火皿を用いて実施した。なお、本研究で燃料として使用したメタノールの理論発熱量は19.8MJ/kgである。

(2)成長火源($n=2$) アルコールと木材クリブを燃料として用いた火源を使用した。アルコール火源では、6行6列に配置した直径100mmの燃料火皿36個を平面的に並べ、順次着火することで再現した。火災成長係数 Q_0 はそれぞれの火皿の着火間隔を調整することによって変化させた。燃

料にはエタノールを用いた。アルコール火源の実験は火災成長係数を4種類、天井高さを1.6, 2.8mの2通りに変化した計8ケースを行った。なお、本研究で使用したエタノールの理論発熱量は25.6MJ/kgである。木材クリブ火源は、2.5cm×2.5cm×42.5cmの木材（米杉）を格子状に4段に組んだ木材クリブ小（寸法42.5cm×42.5cm×10cm）と、8段に組んだ木材クリブ大（寸法42.5cm×42.5cm×20cm）の2種類を使用した。木材クリブ小（実験No.2-9, 10）では天井高さを1.6, 2.7mの2種類、木材クリブ大（実験No.2-11）では天井高さを2.7mの計3ケースの実験を行った。また、木材クリブの下に直径10cmの燃料火皿に30gのメタノールを投入し着火剤として使用した。なお、木材クリブの理論発熱量は16.1 MJ/kgを用いた。

以上(1), (2)に示した実験ケースをまとめたものがTable1である。なお、表中に示した火災成長係数 Q_0 は燃料の重量減少速度に発熱量を乗じて算出した発熱速度の実測値から算出した数値である。

3.4 実験結果

煙拡散時間 t_s を算出するには式(10)における天井流平均厚さ \bar{Z}_s および補正流動距離 R を明らかにする必要がある。以下では、天井流平均厚さ \bar{Z}_s は実験で得られた垂直温度分布($n=0$ の実験ケース)から推定し、補正流動距離 R は実験で得られた煙拡散時間の実験値と式(10)で得られた予測値との比較から推定する。

3.4.1 天井流の拡散性状 先に示した煙拡散時間の予測式(10)の導出において、天井流は火源を中心に同心円状に拡散することを前提としているので、その妥当性を確認する。Fig. 6およびFig. 7は、実験No.0-11 ($n=0, H_f=2.8m, Q_0=39kW$)において、着火後30秒時点および着火後45時点における天井面の温度分布(等温線図)を示したものである。なお、図中のグリッドはFig. 5における座標軸を意味している。また、等温線は初期温度からの温度上昇であり2[K]間隔で示している。図より、天井流は時間の経過と共に同心円状に拡散することが分かる。

3.4.2 煙層厚さ Z_s 煙拡散時間 t_s を算出するために必要な天井流平均厚さ \bar{Z}_s の検討を行う。まず、実験で得られた垂直温度分布($n=0$ の実験ケース)からHeの方法⁴⁾を用いて天井流厚さ Z_s を推定する。なお、天井流厚さ Z_s は流動距離 r と天井高さ H_f の幾何学的形状(r/H_f)に依存する³⁾ことが知られているので、本論文でも同様の手法を用いて実験結果を整理する。Fig. 8は、実験No.0-11 ($n=0, H_f=2.8m, Q_0=40$)において、火源からの流動距離 r が2, 4, 6mの位置($r/H_f=0.7, 1.4, 2.1$)における垂直温度分布(初期温度からの温度上昇)を示したものである。これより、天井流は概ね天井面から0.3m(天井高さの1割程度)の範囲に分布していることが分かる。また、火源からの流動距離が大きくなる(火源から遠ざかる)ほど、天井流の温度減衰は大きくなる。Fig. 9は、定常火源($n=0$)における実験で得られた全ての垂直温度分布を基に、Heの方法⁴⁾を用いて煙層厚さ Z_s を算出し、無次元天井厚さ(=天井流の厚さ Z_s /天井高

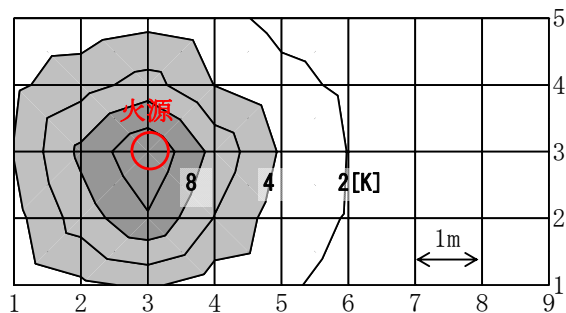


Fig. 6 30秒後の天井流の温度分布(等温線間隔2[K])
Isotherm of Ceiling Jet after 30 seconds of ignition

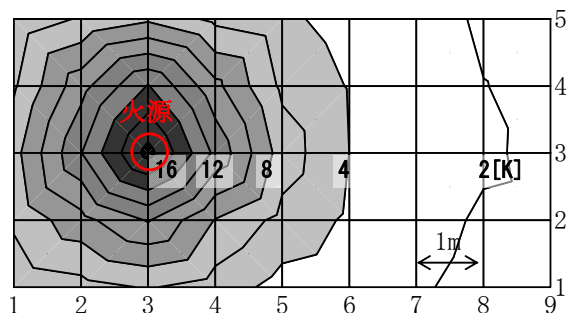


Fig. 7 45秒後の天井流の温度分布(等温線間隔2[K])
Isotherm of Ceiling Jet after 45 seconds of ignition

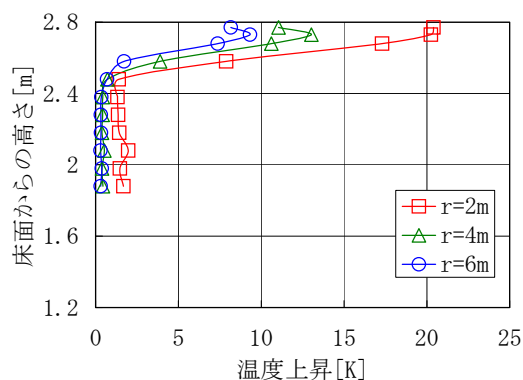


Fig. 8 天井流の垂直温度分布 ($H_f=2.8m$, 着火から90秒)
Vertical Temperature Distribution of Ceiling Jet

さ H_f)と無次元流動距離(=流動距離 r /天井高さ H_f)の関係で示したものである。これより、無次元天井流厚さは、火源径(=火源発熱速度)にはそれ程大きな影響を受けず、無次元流動距離が大きくなるにつれて厚くなる傾向を示すことが分かる。

以上の結果を基に、本論文では天井流厚さ Z_s を式(11)の通り与える。

$$\frac{Z_{s(r)}}{H_f} = \begin{cases} 0.1 + 0.025 \frac{r}{H_f} & (r/H_f \leq 8.0) \\ 0.3 & (8.0 < r/H_f) \end{cases} \quad (11)$$

さらに、式(10)の導出においては、天井流厚さ Z_s の平均

値を用いるため、天井流平均厚さ \bar{Z}_s の算出を試みる。天井流平均厚さ \bar{Z}_s は、天井流の体積 V を煙拡散面積 A_s (=天井流の見付け面積)で除することで得られる (Fig. 10参照)。

$$\bar{Z}_s = \frac{\int 2\pi r Z_{s(r)} dr}{\pi r^2} \quad (12)$$

従って、式(11)および式(12)より天井流平均厚さ \bar{Z}_s を算出し、天井高さ H_f で無次元化すると

$$\frac{\bar{Z}_{s(r)}}{H_f} = \begin{cases} 0.1 + \frac{r}{60H_f} & (r/H_f \leq 8.0) \\ 0.3 \left\{ 1 - \left(\frac{8H_f}{r} \right)^2 \right\} + \frac{224}{15} \left(\frac{H_f}{r} \right)^2 & (8.0 < r/H_f) \end{cases} \quad (13)$$

を得る。なお、流動距離 r の代わりに煙拡散面積 A_s を用いることもできる。

$$r = \sqrt{A_s / \pi} \quad (14)$$

3.4.3 補正流動距離 R 流動距離 r と温度上昇の経時変化の一般的な傾向をFig. 11に示す。ここでは、実験No.0-11 ($n=0$, $H_f=2.8\text{m}$, $Q_0=40$)において、火源からの流動距離 r が1から6mの位置における天井流温度の経時変化を示している。これより、流動距離 r が大きい地点ほど温度上昇の開始が遅くなるのが分かる。この傾向はその他の実験条件においても当てはまることから、各測定点において温度上昇が始まった時点天井流が到達した時間、すなわち煙拡散時間 $t_{s(exp.)}$ と見なした。なお、各測定点における煙拡散時間は、着火してからそれぞれの位置の天井流温度が1[K]上昇するまでの時間とした。

八重樫⁹⁾によれば、天井流の煙濃度に関して補正流動距離 R は流動距離 r に比例するとされている。天井流の巻き込み量と煙濃度は相関性が高いと考えられるので、天井流の巻き込み量についても同様の考えが成り立つと仮定して検討を行う。なお本研究では、実験で得られた煙拡散時間の実験値と式(10)で得られた予測値との比較から補正流動距離 R を推定する。Fig. 12は、天井流の巻き込みが煙拡散時間に及ぼす影響を把握するため無次元流動距離 ($=r/H_f$)が大きい実験条件であるNo.0-11について、実験値から算出した煙拡散時間 $t_{s(exp.)}$ と式(10)を用いて算出した煙拡散時間 $t_{s(cal.)}$ を煙拡散面積 A_s に対して示したものである。なお、実験では、Fig. 11で示したように、流動距離 r と煙拡散時間 $t_{s(exp.)}$ の関係が得られるので、式(14)を用いて煙拡散面積 A_s と煙拡散時間 $t_{s(exp.)}$ の関係に読み替えている。また、予測値 $t_{s(cal.)}$ は、煙層密度 ρ を一定値 ($1.0[\text{kg}/\text{m}^3]$)として扱い²⁾、式(10)において補正流動距離 $R=0$ として算出した場合と $R=0.1r$ および $0.2r$ とした場合のそれぞれについて示している。これより、 r/H_f が大きい場合 (天井高さに比較して流動距離が長い場合)は補正流動距離 R を考慮しない場合の実験値と予測値は大きく乖離しており、補正流動距離を考慮するとそれらは比較的良く一致することが分かる。従って、平面的に大きな空間では、天井流の巻き込みがそ

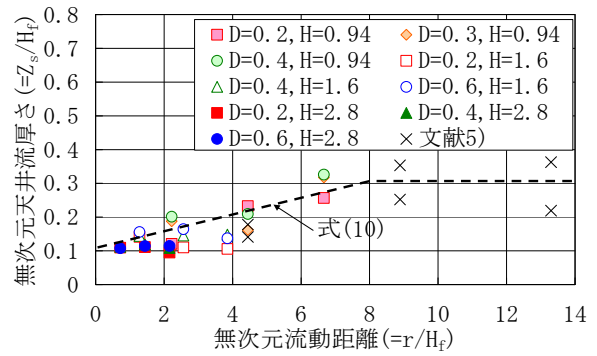


Fig. 9無次元天井厚さと無次元流動距離の関係
Relationship between Non-dimensional Ceiling Jet Thickness and Non-dimensional Traveling Distance

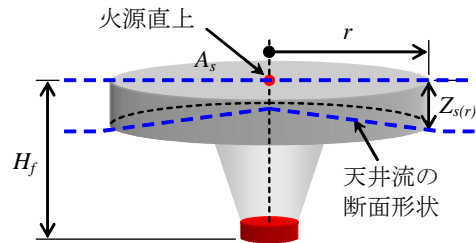


Fig. 10 天井流厚さの概念図
Conceptual Scheme of Ceiling Jet Thickness

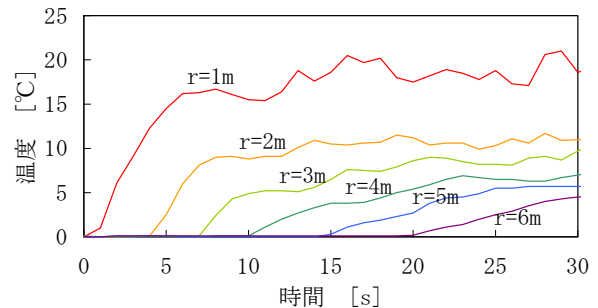


Fig. 11 温度上昇の経時変化 (実験No.0-11)
Time Histories of Temperature Rise

の後の煙性状に大きな影響を与えると言える。なお、図示していないが、 r/H_f が小さい場合は、補正流動距離 R を考慮しなくても実験値と予測値は比較的良く一致していた。

Fig. 13は、補正流動距離 R を

$$R = 0.2r = 0.2\sqrt{A_s / \pi} \quad (15)$$

として煙拡散時間を算出した予測値 $t_{s(cal.)}$ と実験値 $t_{s(exp.)}$ とを全ての実験条件に対して比較したものである。なお、式(15)の係数0.2は、予測値と実験値が一番良く一致する値を試行錯誤により求めたものである。これより、定常火源 ($n=0$)および成長火源 ($n=2$)の全ての実験条件においても実験値と予測値は比較的良く一致していることが分かる。なお、床面積が3000 m^2 の空間で火災が発生した場合の補正流

動距離 R は式(15)より6.2mとなる。この時の火災プルーム流量(=煙発生量)は、式(4)によれば、3層吹抜空間で発生した火災プルーム流量にほぼ等しくなる。建築基準法では床面積3000 m^2 毎に防火区画することを要求し、一方で3階以上の部分に居室がある場合は防火区画することを要求しているため、煙発生量と法規制の関係は良く一致していると考えられることでもある。

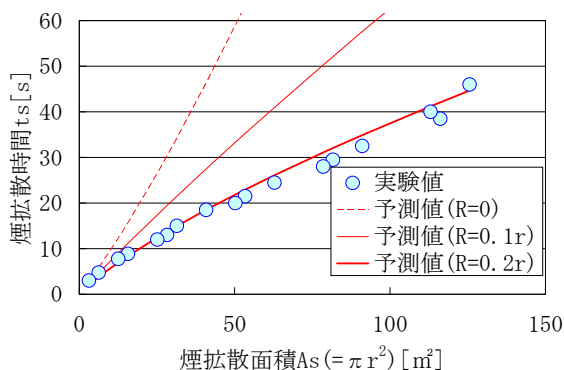


Fig. 12 煙拡散時間の比較 (実験No.0-3)
Comparison between Measured and Predicted
Smoke Diffusion Time

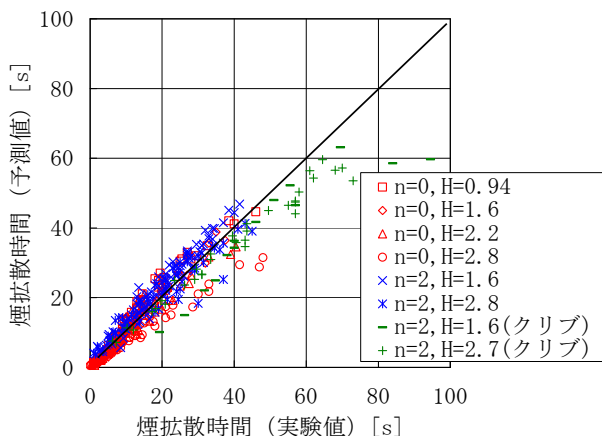


Fig. 13 天井流の巻き込みを考慮した場合 ($R=0.2r$)
Comparison between Measured and Predicted Smoke Diffusion
Time with Entrainment of Ceiling Jet

4. まとめ

本研究は、空間の視認性を考慮した避難開始時間算定に必要な、火災初期の煙拡散性状を予測する簡易予測式を導出することを目的として行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 天井流は新鮮空気を巻き込みながら拡散する。
- 2) 天井流の厚さは天井高さの1~3割であり、流動距離が長くなるほど天井流は厚くなる。
- 3) 天井流の巻き込み量は従来の火災プルーム流量の予測式を用いてモデル化できる。
- 4) 煙拡散時間は、式(13)および式(15)より天井流平均厚さと補正流動距離を算出し、式(10)に代入することによって得ることができる。
- 5) 煙拡散時間の予測式は、定常火源と成長火源ともに適用できる。

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) 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.232~233，(2003)
- 3) THE SFPE HANDBOOK, Fire Protection Engineering (Third Edition), p.4-30, 2002
- 4) Y. P. He, Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment, Fire Safety Journal, 31:19-38, (1998)
- 5) 間瀬亮平他：大平面建築空間における煙拡散性状に関する実験的研究，2008年度日本建築学会関東支部研究発表会，(2009)
- 6) 八重樫剛，須川修身：天井下気流に関する実験的研究-煙濃度予測モデル-，日本建築学会学術講演梗概集A-2分冊，p.95，(2002)