

トンネル火災時における天井ジェットの温度減衰特性 Temperature Decreasing Properties of a Ceiling Jet in a Tunnel Fire

栗岡 均*, 岡 泰資**, 佐藤博臣***, 桑名秀明****

Hitoshi KURIOKA, Yasushi OKA, Hiroomi SATOH, and Hideaki KUWANA

Experiments were conducted to characterize a temperature decreasing property of a ceiling jet in a tunnel fire. Three types of 1/10-scaled tunnels, having the aspect ratio (height/width) of 1/1 to 1/3, were employed. Propane gas was used as a fuel in a 0.1m×0.1m diffusion burner which was employed as a model fire source and set its top surface adjusted the same level to the tunnel floor. The heat release rate was varied in the range of 1.5 to 12 kW.

Based on the experimental results, empirical models for temperature decreasing properties of the ceiling jet considering the aspect ratio of the cross section of the tunnel were presented. The values of empirical coefficients were derived from the experimental results. This deduced model was applied to the 1/2 scaled test results to examine the validity of the model. It is found that this simple model could estimate the temperature in the far field except of in the near fire field.

Key words tunnel fire, ceiling jet, temperature decreasing property, natural convection

1. はじめに

地下街の通路部分やトンネルに代表される水平方向に細長いトンネル状空間で火災が生じた場合、自然換気下では、火源から発生した高温熱気流は天井に衝突後、天井ジェットとなり天井下部空間に高温煙層を形成する。煙伝播に関しては、半田らによる煙先端部の移動速度[1]や松下らによる定常的な煙流れの内部挙動[2]に注目した研究を始め数多くの研究[3]が報告されている。また、側壁の影響を受けない一般執務室での天井ジェットの挙動は、Alpert[4]、Heskestad等[5]により、火源軸を基準とした水平距離に対する温度および流速の減衰予測式が提案されている。さらに、天井に設けられた溝状空間における天井ジェットの挙動についても Delichatsios[6]により温度および速度の減衰予測式が提案されている。これら工学的予測手法は、設計時の火災感知器やスプリンクラーの設置位置の算定および内装材の仕様決定に役立てられている。しかし、Alpert や Heskestad 等の予測式には空間の側壁効果が、また Delichatsios の予測式には、対象とする空間の断面形状が考慮されていないなどの課題が残されている。このためこれらの関係式を用いて、トンネル状空間で火災が天井に衝突するほどの火災に成長した状況下での避難・消防活動時の詳細な輻射熱量を算出する事は難しいと思われる。

筆者等は、幅 2.56m、高さ 2.3m、長さ 400m の馬蹄形断面を有するアスペクト比がほぼ 1:1 の実大トンネルを用いた火災実験から、自然換気時における天井ジェットの流動距離と温度減衰に以下の関係があること

キーワード：トンネル火災、天井ジェット、温度減衰、自然換気

* 鹿島建設技術研究所 主管研究員

** 横浜国立大学工学部 助手

*** 鹿島建設技術研究所 上席研究員

**** 鹿島建設技術研究所 研究員

を見出している[7]。つまり、巻き込み空気による温度減衰が著しい火源表面から熱気流が天井に衝突するまでの領域Ⅰ、熱気流が天井に衝突後、水平方向へ天井高さのほぼ 10 倍までの比較的緩慢な温度減衰性状を示す領域Ⅱおよび温度減衰が天井・壁への熱損失に依存する移動距離が天井高さの 10 倍以上の領域Ⅲの 3 領域に大別できるという知見である。特に領域Ⅱは、火災ブルームが天井に衝突し鉛直方向から水平方向へと流れの方向が変化する乱れの大きい領域であること、比較的火源に近い領域であるため火災あるいは高温熱気流層からの輻射の影響を受けていること、さらに側壁の存在により巻き込み空気量が制限されるため冷たい新鮮な空気だけでなく暖められた空気も巻き込まれるなどの理由により、このような緩慢な温度変化を示したものと考えられる。

このように、この領域Ⅱの存在は火災の早期発見、初期消火、避難・煙制御さらには消防活動などの安全対策決定には無視しえない重要な意味合いをもつと考えられる。さらに、トンネル状空間の火災安全性能の向上（火災感知器や消火器等の防災設備機器の設置条件など）および避難・救援活動のより一層の効率化のために、この領域Ⅱにおける天井ジェットの温度減衰性状に対する空間の断面形状やアスペクト比、長さなどの諸要因の影響を把握すると共に、そのモデル化が重要であると判断される。

そこで本研究では、矩形断面のアスペクト比（ Ap =縦/横で定義）ならびに長さの異なる縮尺比 1/10（天井高さ： $H=30\text{cm}$ ）のトンネル状空間模型を用いた火災実験を実施した。得られた実験結果と既存の Alpert, Heskestad らの天井ジェットに関する温度減衰式にて得られる予測値との比較から、それらの適用性を検討した。また、新たにトンネル空間の断面形状とアスペクト比を考慮した天井ジェットの温度減衰性状を予測する実験式を導出した。これらの実験式をもとに算出した予測値と、アスペクト比が 1:1.6 の断面形状を有する縮尺比 1/2～1/4 に相当する中規模模型実験結果との比較から、新規実験式の適用性を検討した。

2. 実験方法

実験に用いたトンネル状空間および火源規模の概要を表 1 に示す。実験に用いた 3 種類の 1/10 模型の内、 $Ap=1/1$ の模型は厚さ 3mm の鉄製で火源周辺部（火源を中心に長手方向へそれぞれ 45cm の領域）のみ厚さ 10mm の耐火被覆が施されている。模型の全長は 10.2m である。また $Ap=1/2$, 1/3 の模型は厚さ 2mm の鉄製で $Ap=1/1$ の模型と同様に火源周辺部は厚さ 10mm の断熱材が裏打ちされている。なお側壁は耐熱ガラス製で火災やブルームの形状が観測できるようになっている。これら 2 種類の模型の全長はともに 5.4m である。1/10 模型の空間高さはいずれも 300mm であり、模擬火源には 100mm×100mm のガスバーナーを用いた。なお、燃料は LPG である。一方、中規模実験に使用した空間は 3.2m(W)×1.6m(H)の矩形断面を有し、全長は 50.0m の厚さ 100mm のコンクリート製である。天井裏には断面形状が 3.2m(W)×0.6m(H)のダクトスペースがあるが、このスペースは外気や給排気ファンには接続されていない。なお火源近傍は厚さ 50mm の珪酸カルシウム板で養生した。燃料にはメタノールあるいは灯油を用いた。実験条件、温度・速度の測定位置の概要および測定条件の詳細については文献[7, 8, 9]に示した。

本論文で報告する熱気流の温度は、1/10 模型実験、中規模実験に係わらず自然換気時において準定常状態にて観測した天井 10mm における値で、しかも 10 分間燃焼させた測定の後半 3 分間の平均値である。

表 1 実験概要

	1/10 模型実験			中規模実験
アスペクト比 Ap	1/1	1/2	1/3	1/1.6
幅[m]	0.3	0.6	0.9	3.2
高さ[m]	0.3	0.3	0.3	1.6 (2.1)
長さ[m]	10.2	5.4	5.4	50.0
火源面積[m ²]	0.01	0.01	0.01	0.25～1.0
発熱速度[kW]	1.5～12.0	1.5～12.0	1.5～12.0	86.5～411.6

()内の数値は上部ダクト空間を含めた高さ

3. 結果

先にも述べたように、1/10 模型にて得られた実測温度は、実大実験でのⅡ領域に相当する火災プルームが空間天井に衝突後の複雑な流れ場と一律な温度減衰を示す温度と考えられる。

3-1. 天井面での流れが拘束されない場合の予測式との比較

図 1(a)～(c)に 1/10 模型実験で得られた上昇温度と、天井面で流れが拘束されない条件下で誘導された Alpert (式(1)) および Heskestad 等 (式(2)) の提案式との比較を示す。

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= 16.9 \left(\frac{Q^{2/3}}{H^{5/3}} \right) & r/H \leq 0.18 \\ \Delta T &= 5.38 \frac{(Q/r)^{2/3}}{H} & r/H > 0.18 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\Delta T_o^* = \left(\frac{\Delta T}{T_a} \right) / Q_o^{*2/3} = \left[0.188 + 0.313 \left(\frac{r}{H} \right) \right]^{-4/3} \quad (2)$$

ここで H は火源表面から天井までの距離、 Q は発熱速度、 r は熱気流が天井に衝突した位置からの水平距離、 ΔT は熱気流の雰囲気温度からの上昇温度、 T_o^* は無次元上昇温度、 T_a は雰囲気温度、 Q_o^* は $Q / (\rho_a C_p T_a g^{1/2} H^{5/2})$ で定義される無次元発熱速度をそれぞれ意味する。

実測した天井ジェットの手方向 (煙層の進行方向) への温度と既存の予測式にて算出した温度を比較すると、予測温度よりも実測温度は、 Ap の値に関わらず高い温度を示した。また Ap の値が小さくなるにつれて、火源近傍の天井ジェットの温度は高く、かつ移動距離に対する温度の減衰率が大きくなる傾向を示した。

一方、短手方向 (側壁方向) への温度を比較すると、 $Ap=1/1$ の場合、 $r/H=0.5$ (短手方向全域) までほぼ一定値とも見なせる非常に緩慢な減衰を示したが、他のアスペクト比の場合は長手方向の減衰とほぼ同様な減衰性状を示した。

著者等のトンネル状空間内でのプルーム形状に関する実験結果によると、トンネル状空間におけるプルーム幅は自由空間におけるプルーム幅に比べ約 2 倍に広がるものの知見が得られている[10]。この知見に基づけば、 $Ap=1/1$ では、火源から上昇してきた熱気流が天井に衝突する高さで、プルーム幅と空間の横幅は概ね一致する。通常、

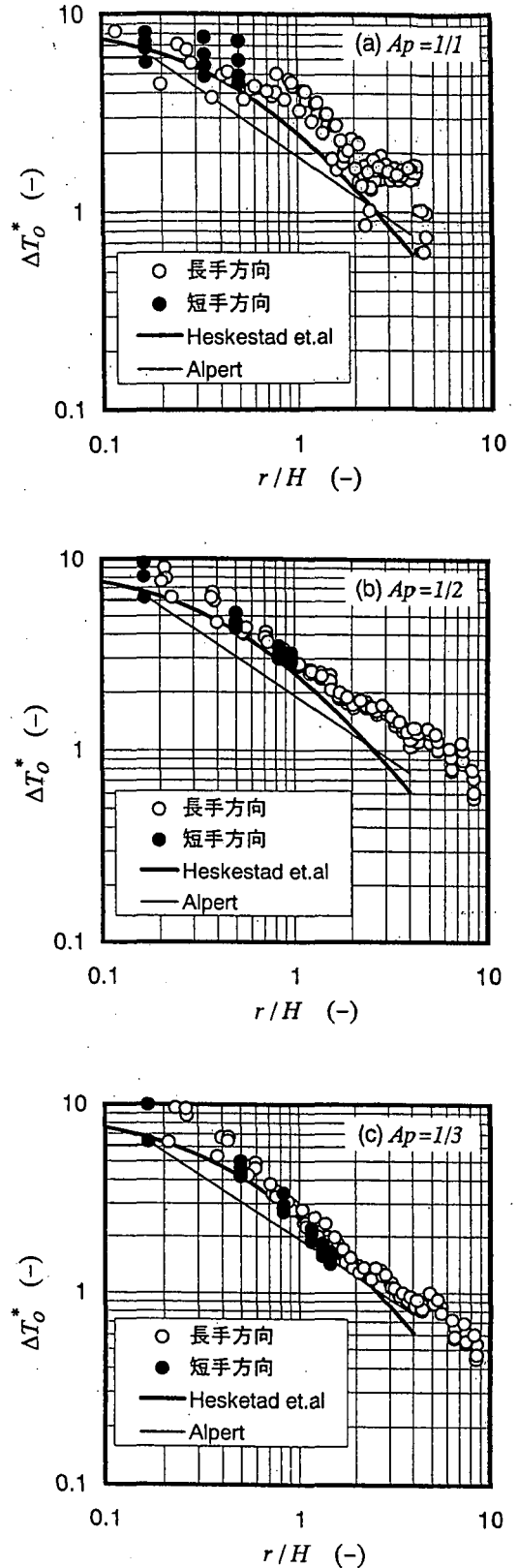


図 1 既存提案式と実測値との比較

天井に衝突した熱気流は、天井下で流れの方向を変え、同心円状に広がる。しかし、今回のように側壁がある場合、短手方向へ同心円状に広がった熱気流は側壁に衝突すると直ちにその流れの方向を変え、後続する短手方向への流れとぶつかり合い、その流れを拘束するとともに長手方向への流れと合流するという非常に複雑な流れの場となる。このため移動距離に対し非常に緩慢な温度減衰性状を示す領域が長くなるものと考えられる。一方 $Ap=1/2$, $1/3$ の場合では、仮にブルーム幅が約 2 倍に広がったとしても天井高さにおいても、依然空間の横幅よりもブルームの拡がり幅が小さいために、 $Ap=1/1$ の空間状態に比べ側壁の影響が小さくなり長手方向とほぼ同じ減衰性状を示したのと考えられる。ただし測定値が少ないものの、Alpert が示しているように $r/H < 0.2$ までの領域において、ほぼ一定温度を示すものと考えられる。

3-2. 天井での流れの拘束のある場合の予測式との比較

天井に設けられた溝状空間に対する Delichatsios の提案式(3)は、予測式を構築するに当たり使用した実験条件、特に下部空間の拡がり問題があるものの、トンネル状空間への適用性を検討した。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{imp}} = 0.29 \left(\frac{H}{l_b} \right)^{1/3} \exp \left[-0.2 \left(\frac{r}{H} \right) \left(\frac{l_b}{H} \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

ここで、 l_b はトンネル状空間幅の半値（原文では溝状空間幅の半値幅の半値）を意味する。また上記の関係式には ΔT_{imp} という火源近傍の代表温度が変数として組み込まれているため、この値を決定する必要がある。

そこで、各アスペクト比毎に火源近傍の代表温度を算出することとした。つまり、 ΔT_o^* を r/H に対し両対数グラフにプロットし、火源から遠く離れた位置から火源方向に向かってグラフ上に描いた直線から、実測温度が逸脱し始める範囲までとして定義し、この逸脱し始める位置での温度をブルームが天井に衝突した近傍の代表温度（ $\Delta T_{imp_virtual}$ と定義、この値を ΔT_{imp} として式(3)に代入）とした。すなわち、図 1 から分かるように、おおよそ $Ap=1/1$ では $r/H=0.5$, $Ap=1/2$ および $1/3$ では $r/H=0.2$ での温度である。これらの温度をもとに実測値および予測値を算出した。なお、予測式中の比例係数は Delichatsios が提案している数値(0.29)を用いた。

各アスペクト比毎の実測温度と式(3)との比較を図 2(a)～(c)に示す。実測温度と予測温度とは異なった傾向を示し、特に $Ap=1/1$ の場合には逆に実測温度が予測温度より

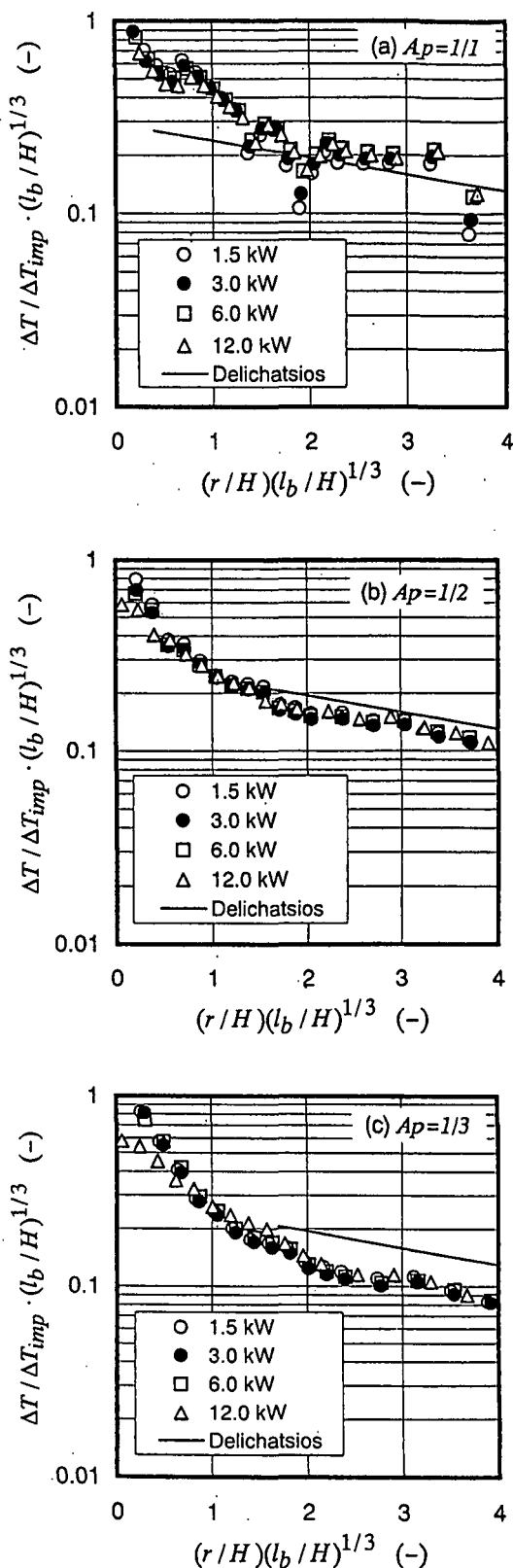


図 2 Delichatsios の提案式と実測値の比較

も高い温度を示した。一方 $Ap=1/3$ の場合には予測温度が実測温度よりも高い温度となった。このように式(3)を用いた予測温度と実測温度には温度差が認められるものの、 $(r/H)(lb/H)^{1/3}=1.5$ 以上の領域における上昇温度は、Delichatsios が提案した -0.20 の係数を保持しながら一律に減衰する性状は一致した。しかし、火源近傍領域に相当する横軸の値が $0 \sim 1.5$ の領域での減衰性状は大きく異なった。このように性状が異なった原因として、

- ① Delichatsios の予測式の構築条件を考えると、燃焼領域あるいは火源近傍のプルーム形成時の巻き込み空気の挙動が自由空間の状況に極めて近いこと
- ② トンネル状空間では、給気取入れ口が限定されるために、排煙に伴う高温ガスと流入空気とが対向流となりお互い影響し合うこと
- ③ トンネル状空間では、プルーム形成時の巻き込み空気の方向が側壁の影響を受け制限されることなどが考えられる。

3-3. 火源近傍の一定温度領域の大きさと発熱速度の関係

図 2 に示したように、発熱速度が 12kW と模型の空間高さに比べ火炎高さが非常に大きな場合と、その他の発熱速度における天井ジェットの減衰性状を比較すると、 $Q=12\text{kW}$ の場合、火炎プルームが模型天井に衝突した近傍の温度は、他の発熱速度における温度に比べ低い温度となる傾向が読み取れる。この現象は、天井に衝突した熱気流の温度が、空間のアスペクト比および火源条件によって異なるという知見と一致する[10]。

しかしながら、先にも述べたようにアスペクト比および発熱速度等の実験条件毎に天井ジェットの移動距離と上昇温度の関係は、温度減衰が緩慢な領域と移動距離に対して相関性の高い一律な減衰性状を示す 2 領域に大別できる。そこでこの境界値を r_c と定義し、かつ距離 r_c が発熱速度の関数として表現できると考え、各発熱速度、アスペクト比毎にプロットしたのが図 3 であるが、 $Ap=1/2$ と $Ap=1/3$ の r_c の結果がほぼ同値となったため重なっている。なお、Alpert はこの非常に緩慢な温度減衰性状を示す領域の温度をほぼ一定と仮定し、かつこの範囲を $r/H < 0.18$ と報告している。図 3 よりトンネル状空間での r_c/H と Q^* の関係は、式(4)のように $Ap=1/1$ および $Ap=1/2$ 以下と大別でき、係数 a およびべき乗数 n をそれぞれ以下のように決定した。ただし、 r_c/H の測定範囲の制限から最小値は 0.2 とする。

$$r_c/H = a \cdot Q^{*n} \quad (4)$$

$Ap=1/1$ の場合 $a=0.69, n=0.43$

$Ap=1/2, 1/3$ の場合 $a=0.80, n=0.40$

図 2 では、火源近傍の代表温度を便宜的に実測値から推定することにより実測値をプロットした。しかしこの手法では実験毎に火源近傍の代表温度を決定しなければならない。そこで、火源から距離 r_c 以上の離れた領域における上昇温度の減衰性状と気流の移動距離の相関が非常に高いことから、火源軸から r_c 離れた位置における上昇温度を ΔT_{imp_rc} として新たに定義した。この ΔT_{imp_rc} が天井下に現れる最高温度 ΔT_{max} と相関があると考え、さらにこの関係が発熱速度の関数として表現できると仮定しプロットしたのが図 4(a)である。アスペクト比毎に特徴が見られ、 $Ap=1/1$ の $Q=1.5 \sim 6.0\text{kW}$ の発熱速度のケースを除いて、ほぼ一定の関係が認められた。 $Ap=1/1$ の模型実験にて得られた

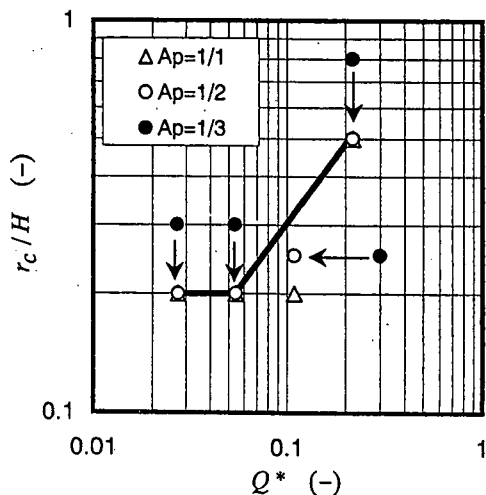


図 3 r_c/H と Q^* の関係

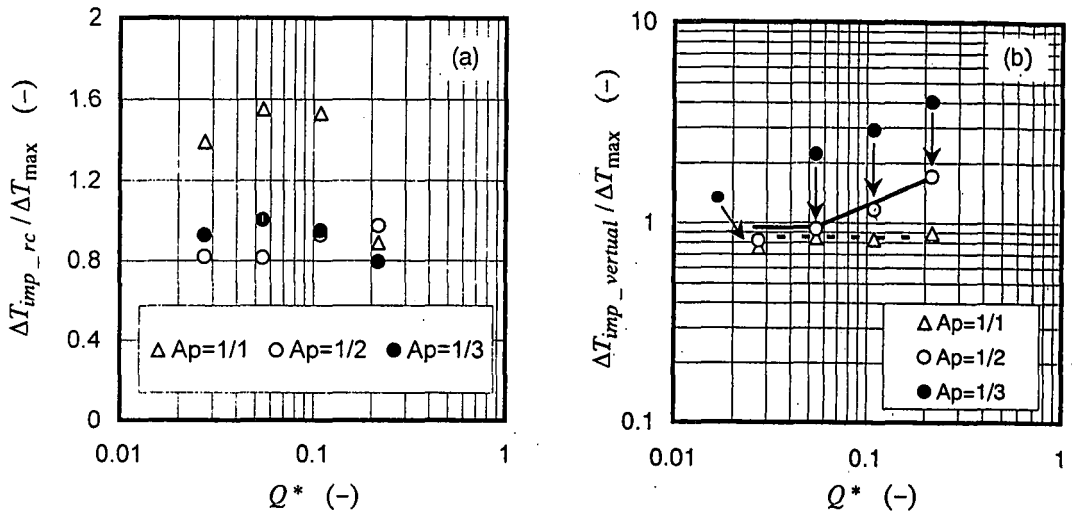


図4 火源近傍代表温度と Q^* の関係

ΔT_{max} は既に報告しているように[8], 周囲の天井温度よりも低い温度を示す傾向を示している。これは実大実験には見られなかった模型実験特有の性状であると判断されることから, ΔT_{imp_rc} と ΔT_{max} にはほぼ一定の関係があると考えられる。

一方, 式(3)に代入すべき火源近傍の代表温度に相当する $\Delta T_{imp_virtual}$ は, 図 4(b)に示したように, 発熱速度に依存せず ΔT_{max} に対しほぼ一定の関係が認められた。しかし $Ap=1/2$ あるいは $1/3$ の場合には, $Q=6, 12\text{kW}$ と発熱速度が大きくなるに連れて $\Delta T_{imp_virtual}$ が ΔT_{max} よりも高くなるという奇異な結果となった。この原因は図 2 にも見られるように, 発熱速度が大きくなるに連れて, 火源直上付近の温度が低くなる傾向があるにも関わらず, 発熱速度に関係なく単一の直線で代表させ $\Delta T_{imp_virtual}$ を算出したためである。近似方法に問題があるものの, $\Delta T_{imp_virtual} / \Delta T_{max}$ と Q^* の関係は(5)式のように表現できる。

$$\frac{\Delta T_{imp_virtual}}{\Delta T_{max}} = a \cdot Q^{*n} \quad \begin{array}{ll} Ap=1/1 \text{ の場合} & a=0.85, n=0 \\ Ap=1/2, 1/3 \text{ の場合} & a=2.74, n=0.35 \end{array} \quad (5)$$

3-4.簡易予測式の提案

予測式①

図 1(a)~(c)に示したように, 側壁の影響を受けない定常状態での天井ジェットに対する既存の予測式ではトンネル状空間での温度を十分な精度で予測できない。そこで, 新たに天井ジェットの上昇温度と距離の間に式(6)の関係が成り立つと仮定する。

$$\Delta T_o^* = a (r/H)^n \quad (6)$$

ただし, 適用範囲は式(4)で求められる値以上でかつ測定範囲内とする。図 1(a)~(c)に示したグラフから, アスペクト比毎に比例定数(a)およびべき乗数(n)を読み取った結果が表 2 である。

べき乗数の値として, Alpert は $-2/3$ を Heskestad 等は $-4/3$ を提案しているが, 本実験からはアスペクト比の違いにより -0.52 から -0.82 までの値となった。このべき乗数および比例定数がアスペクト係数 (α)

表 2 無次元温度 ΔT_o^* 近似の実験定数

	a	n	適用範囲
$Ap=1/1$	3.2	-0.52	$rc/H \leq r/H < 5$
$Ap=1/2$	3.0	-0.62	$rc/H \leq r/H < 9$
$Ap=1/3$	2.6	-0.82	$rc/H \leq r/H < 9$
Alpert	1.93	-2/3	$0.18 < r/H$
Heskestad et al.	2.58	-4/3	$0.1 \leq r/H < 4$

スペクト比の逆数，以下 B_p と略す）に対して一次の関係が確認され，それぞれ B_p を変数として，式(7)，(8)のように表現できる。なお R は相関係数を意味する。

$$a = -0.3B_p + 3.53 \qquad R=0.9643 \qquad (7)$$

$$n = -0.15B_p - 0.353 \qquad R=0.9643 \qquad (8)$$

式(6)で表現された簡易手法にて算出した予測温度と実験値の関係を示したのが図 5 である。予測値と実験値の相関係数は 0.9214 と比較的良好一致を示したものの，適用範囲の制限から火災プルームが空間天井に衝突した直後の複雑な流れ場の温度の予測には問題が残る。しかし，火源から距離 r_c 以上離れた領域での温度予測には適用可能と考えられる。

予測式②

Delichatsios が提案した一律に減衰する領域の表現方法を採用入れながら，かつ火源近傍の性状も記述可能とするために，式(3)を式(9)のように修正する。ここで式(3)中の比例係数がアスペクト比の関数で近似できると仮定した。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{imp}} = a \left(\frac{H}{l_b} \right)^{1/3} \exp \left[b \left(\frac{r}{H} \right) \left(\frac{l_b}{H} \right)^{1/3} \right] \qquad (9)$$

上述したように r_c/H の実測値は，0.2～0.5 の範囲内の値を示す。これはプルームが天井に衝突直後の穏やかな温度減衰性状を示す範囲に相当するが，必ずしもこの範囲外（一律な温度減衰を示す範囲）の性状を規定していない。一方，アスペクト比に関わらず， $(r/H)(l_b/H)^{1/3}=1.5$ を境界として 2 領域に分割し上昇温度の減衰を表現することを考えると，この 2 分割した境界 $(r/H)(l_b/H)^{1/3}=1.5$ はアスペクト比に関わらずほぼ $r=H$ に該当し，また火源上に形成した火災プルームが天井に衝突した時の広がったプルーム径にも相当する。物理的意味からみても，この領域で分割することにより近似性の高い実験式となるものと判断される。そこで， B_p に対する a ， b の依存性を検討した。なお， $(r/H)(l_b/H)^{1/3} \geq 1.5$ となる領域での上昇温度の減衰を意味する勾配値は Delichatsios が提案した値を採用した。その他の領域での実験定数がアスペクト係数の関数として表現できると仮定した。

図 2(a)～(c)から実験定数 a ， b の値を読み取った結果を表 3 に示す。さらにこれらの値とアスペクト係数との相関性が高かったことから式(10)，(11)に示したように B_p に対して一次関数として表現した。結果を表 4 に示す。

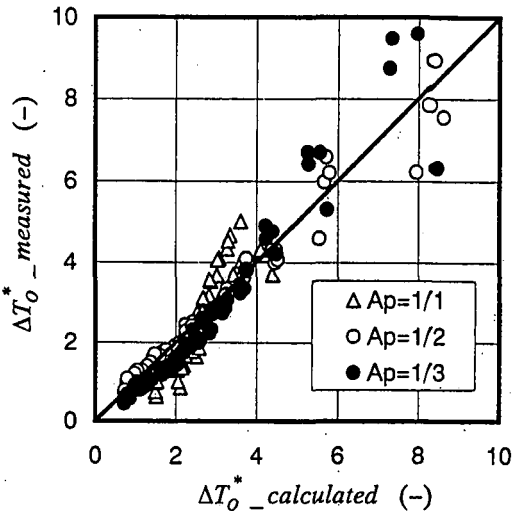


図 5 実測値と簡易予測式①の比較

表 3 式(9)の補正係数の値

適用範囲 アスペクト比	$(r/H)(l_b/H)^{1/3} < 1.5$		$(r/H)(l_b/H)^{1/3} \geq 1.5$
	a	b	a
1:1	0.34	-0.85	0.90
1:2	0.29	-0.92	0.83
1:3	0.22	-1.05	0.80

$$(r/H)(l_b/H)^{1/3} < 1.5 \qquad a = a_1 B_p + a_2, \quad b = b_1 B_p + b_2 \qquad (10)$$

$$(r/H)(l_b/H)^{1/3} \geq 1.5 \qquad a = a_3 B_p + a_4, \quad b = -0.20 \qquad (11)$$

表 4 補正式の各係数

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	b ₁	b ₂
-0.05	0.943	-0.057	0.386	-0.098	-0.766

式(9)~(11)にて算出した予測温度と実測値の関係を示したのが図 6 である。予測値と実測値の相関係数は 0.9185 となった。式(6)では熱気流が天井に衝突した近傍への適用を考慮していないため、 $0.2 < r/H < 10$ を適用範囲としたが、Delichatsios の提案式の補正式 (式(9)~(11)) では $(r/H)(lb/H)^{1/3} < 1.5$ の領域に対しても式(6)よりも若干実測値に近い温度を予測するものの、依然火災プルームが天井に衝突した極近傍の温度までを正確に予測できる訳ではない。

4. 中規模実験結果への適用

新たにアスペクト比 1:2 (実験空間の公称寸法より算出)の中規模実験 (縮尺比 1/2~1/4) の実験を行い、中規模実験結果との比較をもとに、3.4 節で提案した 2 種類の簡易予測式の適用性を検討した。ただし、実験空間の上部に横幅が等しいダクト空間が有り、かつ実験空間とダクト空間に隙間が多い構造となっていたことから、上部高温層がダクト空間にも侵入すると考え、実験時の温度場が実験空間上部のダクト空間にも拡がったものとして解析した。

4.1 予測式①との比較

図 7 に火源中心軸からの水平距離と天井ジェットの上昇温度の関係を、Alpert, Heskestad 等の予測式および予測式① (式(6)~(8))にて算出した結果と実測値を比較して示した。先にも述べたように、ダクト空間の大きさを考慮し、有効天井高さを 2.1m としたことから、簡易式①中の比例定数およびべき乗数を算出するにあたり $Bp=1/1.6$ を代入し、それぞれの値を決定した。図より中規模実験の結果も、温度上昇が火源からの距離に対して一律に減衰していることがわかる。一般居室空間用の Alpert, Heskestad 等の予測値と比較すると、 $r/H < 1$ という火災プルームが天井に衝突した近傍の上昇温度を比較的良い制度で予測しているものの、 $r/H > 1$ では実測温度よりも低い温度となった。一方、予測式①で算出した温度は Alpert, Heskestad 等の予測値よりも、実測値により近い温度を示したものの、予測値の減衰性状は実測値よりも幾分速い結果となった。火源近傍では実測値よりも高い温度を示した。

4.2 予測式②との比較

図 8 に火源中心軸からの水平距離と温度性状の関係を、Delichatsios の予測式および予測式② (式(9)~(11))にて算出した温度と中規模実験の測定結果を比較して示した。Delichatsios の予測式ではその適用範囲の制

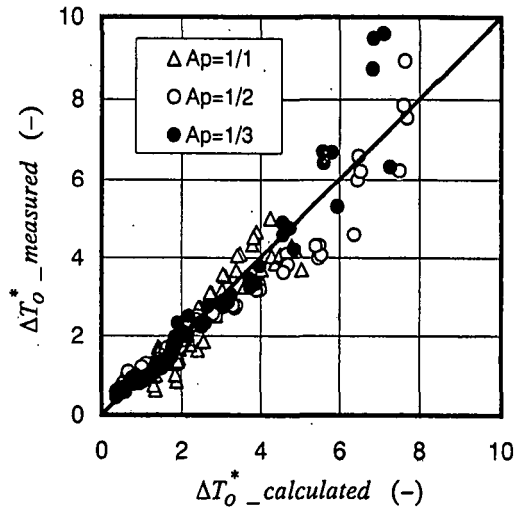
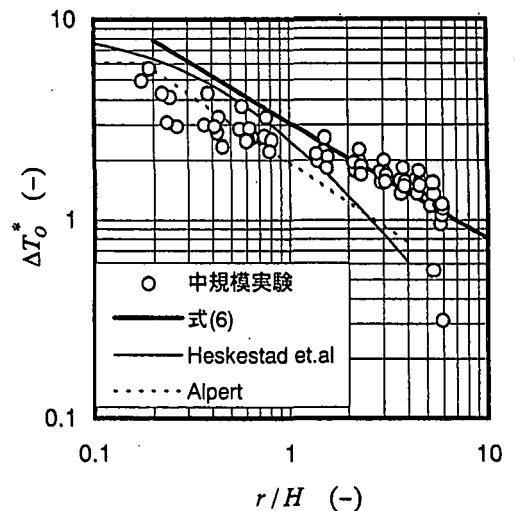
図 6 式(9)~(11)を用いた ΔT_o^* と実測値の比較

図 7 予測式①との比較

限から火源近傍の温度を予測するところがないが、火源から離れた領域での温度は低い温度となるもののその減衰性状は一致している。一方、予測式②では、熱気流が天井に衝突した領域も含めて予測式を導出したにも関わらず、火源近傍の $(r/H)(l_b/H)^{1/3} < 1.5$ の領域において実測値よりも高い温度を示したが、 $(r/H)(l_b/H)^{1/3} \geq 1.5$ の領域においては実験値とほぼ一致した温度を示した。

中規模実験結果と比較した結果、今回提案した2種類の予測式は比較的似通った適合性を示した。なお、予測式②の方は半理論式で導かれていること、今後、火源面積、火源高さ等の各要因を検討して予測式に取り入れることを考慮すると、予測式①よりも柔軟性があるものと判断される。

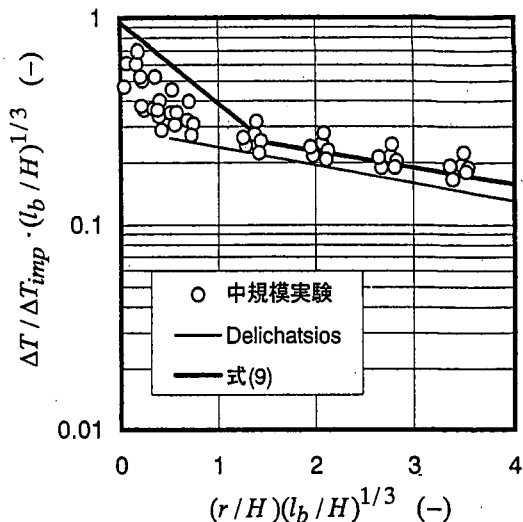


図8 予測式②との比較

5. まとめ

縮尺比 1/10 のアスペクト比が 1:1~1:3 のトンネル状空間模型を用いた実験から、天井ジェットの温度減衰性状として以下のことが明らかになった。

- ① 天井ジェットの温度は、その減衰が殆ど生じない領域と r/H のべき乗数に比例して減衰する領域とに大別できた。ほぼ一定の温度上昇を示す境界領域はアスペクト比に依存し、かつ Q^* の関数として表現できたが、その最小範囲は $r/H=0.2$ と推定される。
- ② 一定温度を示す領域外の長手方向への温度の減衰性状は、拘束条件のない天井ジェットに関する既存の提案式に似通った性状を示したが、温度の絶対値は一致しなかった。この傾向は短手方向への温度減衰に対しても同じであった。
- ③ 天井ジェットの上昇温度の減衰を r/H の関数として、また、この簡易式中の比例定数およびべき乗数を各々アスペクト係数の関数として表現した近似式を提案した。ただし、熱気流が天井に衝突した近傍の温度は、プルーム軸上温度の関数として表現した。
- ④ 熱気流が天井に衝突した一律な温度減衰領域はアスペクト比 1:1 とアスペクト比 1:2 以下に大別され、それぞれ無次元発熱速度の関数となっていた。
- ⑤ 溝状空間に対する既存の提案式では、熱気流が天井に衝突した近傍の上昇温度性状までを再現できない。そこで、新たにこの領域も含めた天井ジェットの温度減衰をアスペクト比の関数として考慮した形で表現した関係式を提案した。

一方、天井ジェットの温度性状に関する提案簡易式を縮尺比 1/2 の中規模実験結果との比較から、以下のことが明らかとなった。

- ① 本実験で使用した縮尺比 1/2 でアスペクト比 1:1.6 の空間内においては、火源から離れた遠方での温度減衰性状は縮尺比 1/10 の模型実験で得られた減衰性状とほぼ一致したが、火源近傍では縮尺比 1/2 の実測値はやや低い温度を示した。
- ② 提案簡易式は、縮尺比 1/10~1/2 の規模の空間まで適用が可能であると判断される。

残された課題

- ① トンネル断面の形状を含めて、天井の材質の違いにより温度性状が異なることが考えられる。そこで、天井の材質を変化させることにより周壁への熱損失の影響を検討する必要がある。
- ② 火源近傍における上昇温度の予測法に関して、火源面積、火源高さを考慮した詳細な検討を行う必要がある。

- ③ アスペクト比が 1:1～1:2 の間で性状が大きく変化することが予測されるので、このアスペクト比間での性状の把握とともに、実大空間での性状との整合性の確認が必要である。

謝辞

解析に用いたデータの一部は自治省消防研究所との共同研究で得られたものであります。また実験を行うに当たりご尽力いただいた横浜国立大学大学院生 抱 憲智、国兼裕子両氏をはじめ関係者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 半田隆, 浜田俊孝他; 実大廊下における火災気流の煙流動性状 (Ⅰ), (Ⅱ), 日本火災学会論文集, Vol.26, No.2, pp.1-16 1976, Vol.28, No.2, pp.1-10, 1978
- 2) 松下敬幸, 若松高志; 水平廊下における煙先端部の移動の定式化と実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 468 号, pp.193-198, 1995
- 3) 例えば 半田隆, 浜田俊孝他; T 字型実大廊下における火災気流の流動性状の実験研究, 日本火災学会論文集, Vol.27, No.1, pp.1-8, 1977
- 4) Alpert, R.L.: Fire Technology, 8, pp.181, 1972
- 5) Heskestad, G. and Delichatsios, M.A.: "The Initial Convection Flow in Fire", 17th Int. Symposium on Combustion, Combustion Institute, pp.1113-1121, 1978
- 6) Delichatsios, M.A.: Combustion and Flame, 43, pp.1-10, 1981
- 7) Kuwana, H., Satoh, H., and Kurioka, H.: "Scale Effect on Temperature Properties in Tunnel Fire", Proceedings of third International Conference of Safety in Road and Rail Tunnels, Organized and sponsored by University of Dundee and Independent Technical Conference Ltd., pp.87-96, 1998
- 8) 栗岡 均他; 地下トンネルの火災安全設計法の開発に関する実験的研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.264-267, 1996
- 9) 桑名秀明他; 中規模トンネルにおける熱気流性状, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.306-309, 1999
- 10) 国兼裕子他; プルーム性状への空間断面形状の影響, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.294-297, 1999
- 11) 抱 憲智他; トンネル状空間における火災性状に関する研究 (その 4) —アスペクト比を考慮した天井ジェット性状予測法の検討—, 平成 11 年度日本建築学会大会梗概集, pp.191-192, 1999