

トンネル空間の火炎形状について

Flame Shape in Tunnels

栗岡 均* 岡 泰資** 滝川 慎一*** 今関 修****

Hitoshi KURIOKA, Yasushi OKA, Shinnichi TAKIGAWA and Osamu IMAZEKI

Two kinds of experiments were carried out to investigate the effects of longitudinal ventilation on flame behaviour in tunnel. One was conducted to examine whether any length should be adopted as a representative length when the flame length in tunnel is arranged and to confirm the similarity for the flame length using three kinds of tunnel. The other was also done to make clear flame shape in detail using a 1/20 scaled model tunnel.

Flame length, maximum flame width and its position were adopted as the variables which characterize the flame shape in a tunnel. The effect of longitudinal ventilation to the flame shape was also considered. New empirical formulae for these variables which were represented by the combination function of heat release rate and ventilation velocity were developed. The values of empirical coefficients and exponents were derived from the experimental results.

Keywords : fire, tunnel, underground market, heat release rate, flame

1. はじめに

トンネル火災時の構造部材への熱的影響は、自由空間での火災性状に関する知見をトンネル空間に適用し、これに過去の火災実験結果^[1]やCFD解析手法^[2]を組み合わせることにより総合的な観点から評価・検討されてきた。しかし、トンネルは設置場所や使用目的に依存してそれぞれ固有の特性を有するため、上述の手法では、過大に安全側あるいは危険側の結果を導く可能性がある。

個々のトンネルに潜在する火災危険要素の抽出と危険度評価を実施するには、煙や熱の流動拡散の推進力となる火災ブリューム性状や熱放射の主要因となる火炎形状などの基本的な火災特性を十分に把握し、これらの知見を蓄積した上での合理的な火災安全設計法の構築が必要と考えられる^[3]。このためには実大規模の実験を実施し、得られた結果を用いてこのような設計法を確立することが望まれるが、大規模実験は人的にも金銭的にも容易ではなく、たとえ実施可能であっても実験ケースが限られることが多いためシステマティックにデータを取得することは難しい。

そこで、本研究では実大規模の1/2^[4-6]、1/4^[7]および1/20^[8]と縮尺の異なった三種類の模型トンネルを用いて、特に火源近傍の火災性状に注目した実験を実施し、自由空間で成立する火炎形状に対する相似則がトンネル空間内でも適用可能かを検討した。また、トンネル内には常時空間内の環境保全や走行の安全性を保持するために、縦流換気あるいは外界との圧力差による自然換気による流れが存在する。これらの換気流の有無が火炎長さ、最大火炎幅およびその呈示位置といった火炎形状を記述する物理量に与える影響を1/20模型実験結果をもとに詳細に検討し、これら物理量の簡易的なモデル化を行った。

2. 火炎長さに対する相似則の検討

自由空間でのプール火災における火炎長さは、代表長さを d (円形火源の場合は直径、矩形火源の場合は面積が等価な正方火源の一辺の長さあるいは長辺(D_1)および短辺の長さ(D_2))として、種々の規模の異なる

火災, トンネル, 地下街, 発熱速度, 火炎性状

* 正会員 博士(工学) 鹿島建設 技術研究所 **

博士(工学) 横浜国立大学大学院工学研究院

*** 横浜国立大学大学院工学府

**** 鹿島建設 ITソリューション部

実験間の力学的相似を保存するために、式(1)で定義される無次元発熱速度を用いて $L_f/d \propto Q_1^{*n}$ なる関係が成り立ち、 $Q_1^* \geq 1$ では $L_f/d \propto Q_1^{*2/5}$ 、 $Q_1^* < 1$ では $L_f/d \propto Q_1^{*2/3}$ と、発熱速度の規模に依存して、その性状が変化することが報告されている^[9]。

一方トンネルのように空間高さに制限があるような空間においては、式(1)で定義される無次元発熱速度のほかに、床表面から天井までの高さ(H)と火源径の代表長さを用いて、式(2)で定義される無次元発熱速度を導出することができる^[10, 11]。

$$Q_1^* = \frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2} d^{5/2}} \quad (1) \qquad Q_2^* = \frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2} d^2 H^{1/2}} \quad (2)$$

そこで、トンネル火災時の火災形状に対してフルード則が成立するのか、さらに火災長さに対する無次元数の代表長さをどのように定義すべきかを検討するために、三種類の規模の異なる模型トンネルを用いた火災実験^[4-8]を行った。以下にその概要を記述する。

2.1 相似則確認実験の概要

表1に示したように、縮尺比が 1/20, 1/4, 1/2 の三種類の模型トンネルを使用した。どのトンネル断面も矩形で、その幅と高さの比は 1/2 (=高さ/幅) である。火源の大きさは 1/20 模型に使用した 0.1m×0.1m を基準に、模型の縮尺比に応じて相似的に変化させた。すべての実験において、火源はトンネル短手方向断面中央の床面に設置した。火源近傍および天井近傍の温度性状を把握するために、トンネル長手方向へ火源中心軸を通過する断面に設置した熱電対網および天井近傍に設置した熱電対により温度を計測した。熱電対の設置位置の詳細は文献^[4-8]を参照いただきたい。なお、2.2 節以降に示す火災長さは、実測値をもとに作成した温度分布図から、温度上昇が 250K 以上の領域を火災領域として定義した長さである。

表1 模型の概要および実験条件一覧

縮尺比	模型トンネルの大きさ 高さ×幅×長さ [m]	火源面積	燃料	発熱速度 [kW]	構造体材料
1/2	2.7×5.4×40	0.79～2.45 (m ²)	ガソリン, ヘプタン	1500～5000	鉄骨フレーム＋ 耐火パネル
1/4	1.6×3.2×50	0.25～1 (m ²)	メタノール	84～410	コンクリート
1/20	0.3×0.6×5.4	6.25～300 (cm ²)	LPG	0.4～36	鉄

2.2 無次元発熱速度と火災長さの関係

トンネルという空間形状から火災時の煙を伴った熱気流は、トンネル天井に沿って火源位置からトンネル長手方向へと流れる。一方、トンネル床面付近の新鮮空気は、火源に向かって流れる。このことから新鮮空気の流れの方向と火源の相対的な位置関係は、燃焼性状言い換えれば火災の長さに影響を及ぼすと考えられる。つまり、自然換気時および縦流換気下で火災がトンネル天井に接炎しない時（以後、非接炎時と記述）は、図1に示したように、トンネル長手方向への新鮮空気の流れに相対するトンネル短手方向の火源長さ D_2 が、火災の長さに重要な影響を与える長さになると考えられる。さらに火災ブリュームへは、火源の縦横比 $((D_2/D_1)^n)$ も関連すると考え、縦流換気下の非接炎時の実測結果を用いて $n=-1 \sim +1$ まで変化させ、火災長さと無次元発熱速度の関係を検討したところ $n=1/2$ の場合が最も相関性が高い結果となったことから、代表長さを検討する際に自然換気時および縦流換気下の非接炎時は $D_2 \cdot ((D_2/D_1)^{1/2}) = D_2^{3/2}/D_1^{1/2}$ とした。一方、縦流換気下の接炎時については、非接炎時と同じべき数で火源アスペクト比に寄与するものと仮定して整理を行うとともに、接炎時は、火災が一種の障害物となるため火災とトンネル側壁間へ流れ込む新鮮空気

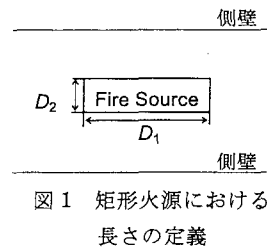


図1 矩形火源における長さの定義

と接するトンネル長手方向の火源長さ D_1 が、火炎の長さに重要な影響を与える長さになると考えられる。そこで、新鮮空気の流れ方向の火源長さ D_1 に対する火源の縦横比(D_1/D_2)を用いて、代表長さとして $D_1 \cdot ((D_1/D_2)^{1/2}) = D_1^{3/2}/D_2^{1/2}$ とした。

以上をまとめるとトンネル内の火炎長さと発熱速度の関係を記述するための代表長さとして、 $D_0 (= (D_1 \cdot D_2)^{1/2})$ 平均火源径[m], D_1 : トンネル長手方向への火源長さ[m], D_2 : トンネル短手方向への火源長さ[m], H : 床表面から天井までの高さ[m], $DD_1 (= D_2^{3/2}/D_1^{1/2})$: 修正火源径 1[m], $DD_2 (= D_1^{3/2}/D_2^{1/2})$: 修正火源径 2[m] の 6 種類を取り上げた。

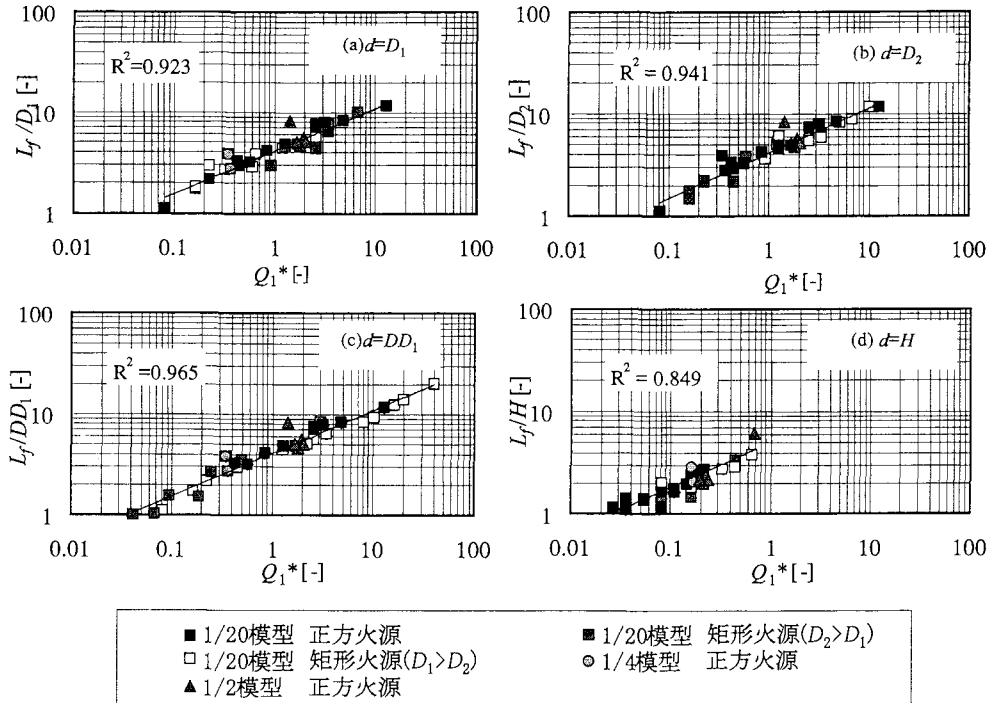


図2 火炎長さと種々の代表長さにて定義した無次元発熱速度(Q_1^*)の関係

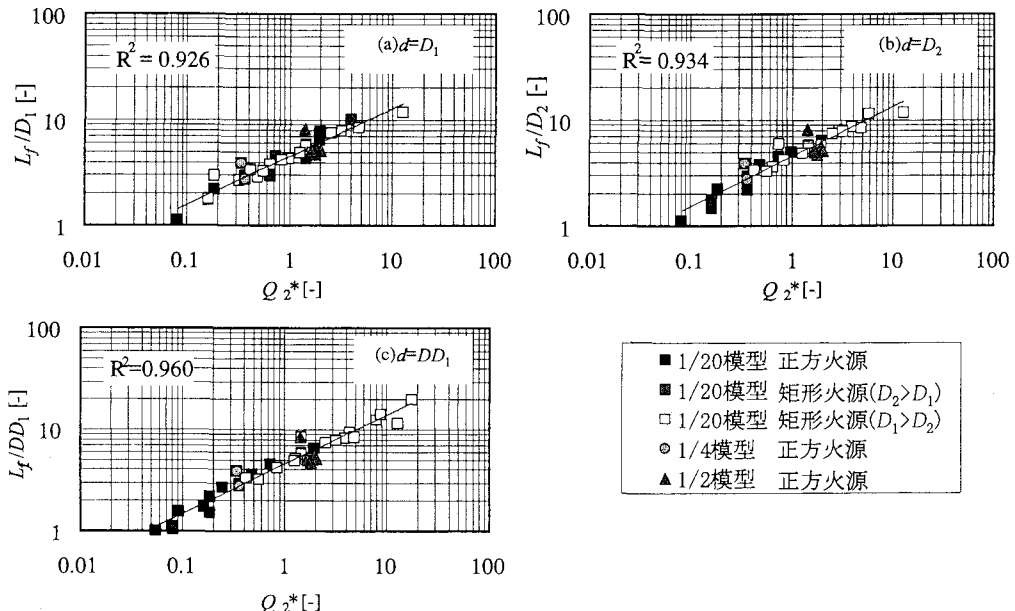


図3 火炎長さと種々の代表長さにて定義した無次元発熱速度(Q_2^*)の関係

まず、自然換気時の火炎長さや無次元発熱速度の関係を検討した。なお、着目した代表長さは、上述した6種類の内 D_1 , D_2 , H , DD_1 の4種類である。自由空間での火炎長さは発熱速度の規模に依存してそのべき乗数に変化するが、ここでは実験範囲を一つの回帰式で近似することにより相関性を検討した。

図2(a)～(d)に式(1)中の代表長さに上述の4種類の長さを用いて算出した無次元発熱速度と無次元火炎長さの関係を示す。これらの図にプロットされている火炎長さは殆どの条件において、トンネル天井に接炎している結果である。これらの図に示したように $1/20 \sim 1/2$ の異なる縮尺模型実験間における無次元発熱速度と無次元火炎長さの関係は、代表長さとしてトンネル空間高さ H を採用した場合を除き、相関係数の値が $0.92 \sim 0.96$ と高い相関性が得られた。また式(2)で定義される無次元発熱速度についても同様に代表長さを変化させて検討した結果を図3(a)～(c)に示したように、相関係数は $0.92 \sim 0.96$ の範囲の値となり、式(1)とほぼ同等の高い相関性が得られた。

以上より、トンネル空間における火炎長さについても、自由空間と同様にフルード則が適用できることが確認でき、無次元火炎長さは無次元発熱速度で整理できると判断される。本研究においては無次元発熱速度を式(1), (2)で定義する場合の代表長さとして、 $d=DD_1$ を採用した時に最も相関性の高い結果を示したことが、若干ではあるが式(2)より式(1)で定義される Q^*_1 で整理した結果が良い相関性が得られたこと、自由空間での火炎高さに関する既存式と比較検討することを鑑み、無次元発熱速度として式(1)で定義される Q^*_1 を用いて以下の議論を進めることとする。

3. 火炎形状把握実験の概要

表1に示した $1/20$ 模型を用いて、二種類の実験を行った。一つは火炎形状および火源近傍の熱的性状へのトンネル断面の縦横比の影響を検討するための実験シリーズ^[12, 13]で、トンネル高さを 0.3m で一定とし、幅を 0.3m , 0.6m , 0.9m と3種類変化させた模型トンネルを使用した。トンネル断面の縦横比に係わらず、火源は給気側開口から 2.25m の位置にトンネル短手方向に対し中央に、かつ火源上表面がトンネル床面と同じ高さに設置した。なお、火源の大きさはいずれの実験の場合も $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ で一定とした。もう一方は火炎形状への火源形状の影響を検討するために、高さ 0.3m , 幅 0.6m のトンネルを用いて、正方火源および矩形火源と火源形状を変化させた (A: 正方火源, B: 矩形火源 ($D_2 > D_1$), C: 矩形火源 ($D_1 > D_2$)) 実験シリーズである^[14]。いずれのシリーズとも発熱速度は $4.5 \sim 36\text{kW}$ (供給したプロパン流量から完全燃焼を仮定し算出した値)、換気速度は $0 \sim 0.8\text{m/s}$ (各実験における設定風速) の範囲で変化させた。発熱速度と縦流換気風速の組み合わせは、縦流換気風速により火炎が下流側に著しく傾斜する場合を除いた範囲とした。実験は1ケースに対して10分間燃焼を継続し、解析には準定常状態に達したと判断される測定時間7分から10分の3分間の平均値を使用した。

3.1 トンネル空間での仮想点源

ブリューム領域の温度・速度の軸上性状や水平分布性状を点熱源理論にてモデル化する場合、仮想点源長さを導入することが多い。そこで、トンネル空間においても同様にこの考え方が有効であると判断し、自然換気時におけるトンネル内の仮想点源についてその位置と発熱速度の関係を検討した。

2.2 節で検討した結果、自然換気時の代表長さとして DD_1 が最も適切な長さであったことから、仮想点源の整理においてもこの長さを用いて実測値を整理した。火源表面から

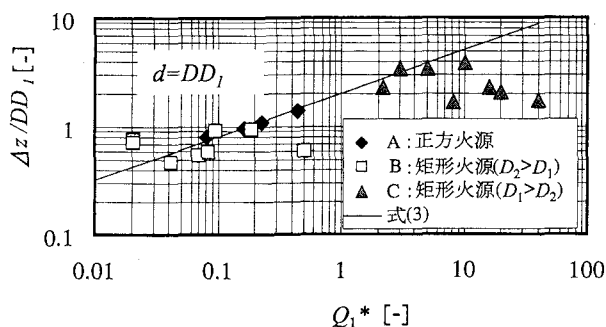


図4 発熱速度と仮想点源長さの関係

の仮想点源までの距離 (Δz) は、各高さの火源中心軸上の温度から半径方向の半減温度との距離を求め、この距離の近似線と火源中心軸の交点を仮想点源として算出した。後述するように、火源長さならびに最大火炎幅呈示位置が無次元発熱速度の $2/5$ 乗の関数となっていることより、自然換気時の仮想点源距離も無次元発熱速度の $2/5$ 乗の関数とし式(3)で記述した。無次元発熱速度と仮想点源長さの関係を図4に示す。

$$\Delta z / DD_1 = 2.0 Q_{1d=DD1}^{2/5} \quad (3)$$

図5に正方火源に対する既報告の仮想点源式^[10]との関係を示す。トンネル内に設置した場合の正方火源における仮想点源長さの実測値は、自由空間における Heskestad 及び Zukoski によるモデル^[10]とは異なった傾向を示した。また Thomas 式^[10]による結果は実測値よりも大きな値を示した。これ以後の仮想点源長さ Δz は式(3)より算出した値を用いることとする。

$$\text{Thomas 式} \quad \Delta z = 1.5 A_f^{1/2}$$

$$\text{Heskestad 式} \quad \Delta z = -1.02d + 0.083 Q^{2/5}$$

$$\text{Zukoski 式} \quad \begin{aligned} \Delta z / d &= c + 0.0659 (Q^{2/5} / D) & Q^{2/5} / D > 16.5 \\ \Delta z / d &= c + 0.01015 (Q^{2/5} / D)^{5/3} & Q^{2/5} / D \leq 16.5 \end{aligned} \quad \begin{aligned} &\text{床あり } c = -0.50 \quad \text{床なし } c = -0.80 \end{aligned}$$

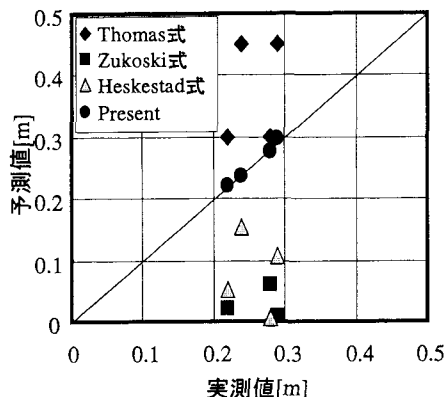


図5 仮想点源距離の提案式と実測値の比較

3.2 実験結果の整理方法

トンネル内の換気状態、すなわち自然換気下と縦流換気下で火炎性状が異なると推定されたことから、それぞれの条件下で実験結果を整理した。図6に示すように、火炎は火源から最大火炎幅呈示位置までと、最大火炎幅呈示位置から火炎先端までの二つの円錐形モデルの組合せで記述できると考え、火炎形状に係わる長さとして、火炎長さ (L_f)、火炎の主軸の垂線と給気側に接する火炎外縁部までの位置で定義される最大火炎幅 (B_{max})、最大火炎幅呈示位置 (L_{Bmax}) を採用した。これらの値は、火源中心軸を基準に長手方向および短手方向に 5cm 間隔に設置した熱電対網により測定した温度を基に等温度線図を作成し、温度上昇が 250K 以上の領域を火炎領域と定義し、等温度線図から読み取った値である。

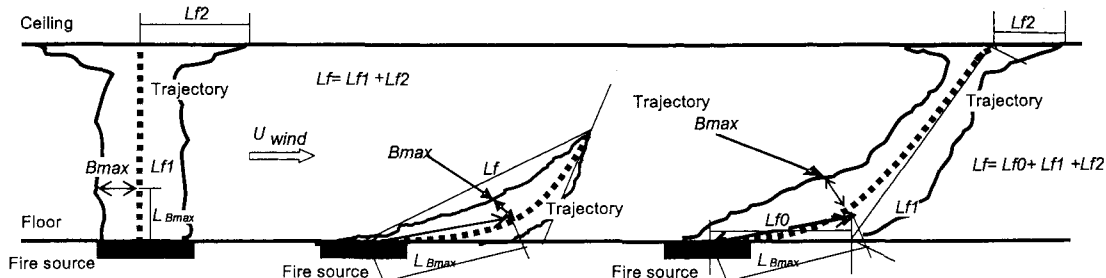


図6 火炎形状を記述するための変数の定義

Alpert 等^[10]が実施した無限水平天井下的高温煙層の流れ性状と異なり、トンネル内では天井に衝突後一次的に熱気流が流動していくためにブリュームの熱特性が天井空間においても保持されており衝突後も一定の性状を示すと考えられる。そこで、火源面から天井までの距離と天井部を這う領域の和を火炎長さとした。

火炎形状を記述する長さとして読み取った長さを整理するための代表長さとしては、2.2 節で示した 6 種類を用いて算出した無次元発熱速度 (Q_d^*) との相関性の結果を表2、表3に示すとともに、フルード数 (Fr_d) との相関性の結果を表3に示す。自然換気時には天井に接炎していない実験ケースが少ないため、全

ケースをまとめて検討した結果、トンネル開口側からの流れに影響を受けるとして考えた修正火源径 $1(DD_1)$ を用いた無次元数を採用することにより、火炎形状を記述する長さや無次元発熱速度の相関性が高くなった。

縦流換気時においては、トンネル天井へ接炎の有無により異なった傾向がみられ、接炎しない場合においては、自然換気の場合と同様に DD_1 を採用したときに相関性が高く、天井に接炎する場合においては、修正火源径 $2(DD_2)$ を用いた無次元数との相関性が高い結果となった。これは、天井に接炎するような大きな火源規模の場合、火炎が一種の障害物となることより、換気流と相対する火炎面積は火源幅とトンネル高さの積に比例するものと考えられる。そのため火炎形状を表す長さに影響を及ぼすのは、換気流の流れに平行な面からの空気の巻き込みであり、この量は換気流の流れに平行な火源長さ(D_1)に依存したためと考えられる。

表 2 自然換気時の火炎特性と代表長さが異なる無次元発熱速度の相関関係

特性値	$Q_1^* d=H$	$Q_1^* d=DD_1$	$Q_1^* d=DD_2$	$Q_1^* d=DD_0$	$Q_1^* d=DD_1$	$Q_1^* d=DD_2$
L_f/d	0.5645	0.8182	0.8431	0.8151	0.8872	0.8626
B_{max}/d	0.8538	0.7553	0.8649	0.7727	0.9208	0.8419
$L_{B_{max}}/d$	0.0375	0.4739	0.5871	0.4227	0.7475	0.657
$(L_{B_{max}}+\Delta Z)/d$	0.083	0.4635	0.5117	0.2671	0.7491	0.7213

表 3 縦流換気時の火炎特性と代表長さが異なる無次元数の相関係数

縦流換気(天井に接炎しない場合)												
特性値	$Q_1^* d=H$	$Q_1^* d=DD_1$	$Q_1^* d=DD_2$	$Q_1^* d=DD_0$	$Q_1^* d=DD_1$	$Q_1^* d=DD_2$	$Fr_{d=H}$	$Fr_{d=DD_1}$	$Fr_{d=DD_2}$	$Fr_{d=DD_0}$	$Fr_{d=DD_1}$	$Fr_{d=DD_2}$
L_f/d	0.2863	0.6228	0.8629	0.7539	0.8968	0.7001	0.3859	0.3262	0.4111	0.3398	0.5087	0.2315
B_{max}/d	0.0859	0.8171	0.7933	0.7132	0.8988	0.9101	0.0718	0.0932	0.207	0.0733	0.3995	0.3781
$L_{B_{max}}/d$	0.1594	0.7718	0.8678	0.674	0.9419	0.9071	0.2532	0.1558	0.3014	0.1644	0.4673	0.2831

縦流換気(天井に接炎する場合)												
特性値	$Q_1^* d=H$	$Q_1^* d=DD_1$	$Q_1^* d=DD_2$	$Q_1^* d=DD_0$	$Q_1^* d=DD_1$	$Q_1^* d=DD_2$	$Fr_{d=H}$	$Fr_{d=DD_1}$	$Fr_{d=DD_2}$	$Fr_{d=DD_0}$	$Fr_{d=DD_1}$	$Fr_{d=DD_2}$
L_f/d	0.4578	0.711	0.6747	0.5877	0.8118	0.8409	0.00001	0.0096	0.0006	0.0055	0.0695	0.1109
B_{max}/d	0.4858	0.7856	0.693	0.6488	0.8353	0.8879	0.001	0.0074	0.00001	0.007	0.0527	0.0943
$L_{B_{max}}/d$	0.4095	0.8103	0.8279	0.6223	0.8141	0.9047	0.1227	0.0932	0.0611	0.0373	0.1674	0.2111

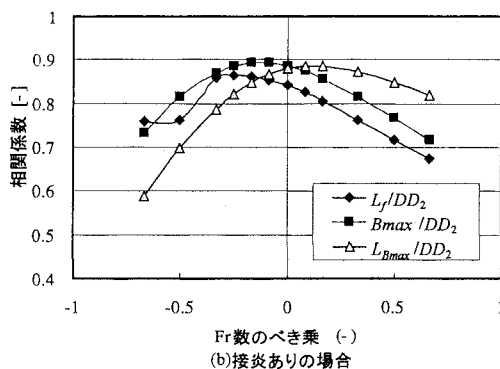
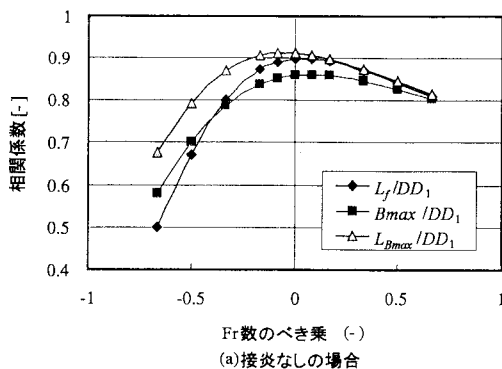


図 7 縦流換気時の火炎形状を示す各特性長さや Fr 数のべき乗数の関係

縦流換気下の火炎の傾斜角に関する検討^[15]で報告したように、火炎長さや最大火炎幅、傾斜角度等の火炎形状を決定する支配要因として、発熱速度で決まる浮力によるものと縦流換気風速による火炎の傾斜等によるものとの二つの要因が挙げられ、この比によって火炎傾斜が決定されるとともに火炎形状が大きく影響を受けるものと考えられる。そこで支配因子の組合せ関数を $Q^m \cdot Fr^n$ と考え（ここでは $m=1$ とする） Fr 数のべき乗数 (n) を系統的に変化させ実測値との相関性を検討した。

図 7(a)に示すように、縦流換気下であっても接炎していない場合は、 Fr 数のべき乗数 $n=0$ としたときに最も高い相関性を示したため、以後の解析では火炎長さへの換気風速の影響を無視することにする。図 7(b)に示すように、トンネル天井に接炎している場合の火炎長さや火炎幅に関しては $n=-1/6$ 、最大火炎幅呈示位置に関しては $n=1/6$ の組合せが最も相関性が高かった。トンネル天井に接炎するような火源規模が大きい場合に、火炎長さや火炎幅と最大火炎幅呈示位置の性状が異なるのは、火炎長さや火炎幅に関しては、縦流換気

により火災気流が冷却され火災周辺部で温度低下が生じたことが原因と考えられる。

以上の結果より本報告では、代表長さとして自然換気時および縦流換気下で天井に接炎していない場合は DD_1 を、縦流換気下で天井に接炎している場合は DD_2 を代表長さとして、無次元数を用いた簡易式で実験結果を記述することとする。

3.3 自然換気時の火災形状特性

(1) 火炎長さ

トンネル空間においても、自然換気時に正方火源上に形成される概ね垂直に立ち上がる火炎の長さは、天井面への接炎の有無にかかわらず図8に示すように無次元発熱速度 $Q_{1d=DD1}^*$ で整理すると、トンネル断面の縦横比（以下 A_p と記述）により $A_p=1/1$ と $A_p=1/2, 1/3$ のグループでそれぞれ整理できた。

自由空間における火炎長さは無次元発熱速度の $2/3$ 乗から $2/5$ 乗に変化するが、 $A_p=1/2$ 以下のトンネル空間においても、修正火源径(DD_1)にて求めた無次元発熱速度により同様の性状を示し、式(4)の実験式を得た。

$$A_p=1/1 \quad L_f/DD_1=18Q_{1d=DD1}^{*3/4} \quad 0.4 < Q_{1d=DD1}^* < 4$$

$$A_p=1/2, 1/3 \quad L_f/DD_1=5.3Q_{1d=DD1}^{*2/3} \quad 0.04 < Q_{1d=DD1}^* < 4 \quad (4)$$

$$L_f/DD_1=4.4Q_{1d=DD1}^{*2/5} \quad 4 < Q_{1d=DD1}^* < 40$$

(2) 最大火炎幅（長手方向）

自然換気時における長手方向の最大火炎幅 B_{max} は、図9に示すように、トンネル断面アスペクト比に依存せず、修正火源径 $1(DD_1)$ にて算出した無次元発熱速度 $Q_{1d=DD1}^*$ にて記述でき、発熱速度の領域に依存して $2/3$ 乗から $2/5$ 乗に比例した性状を示した。

$$B_{max}/DD_1=1.0Q_{1d=DD1}^{*2/5} \quad 0.04 < Q_{1d=DD1}^* < 0.4$$

(5)

$$B_{max}/DD_1=0.8Q_{1d=DD1}^{*2/3} \quad 0.4 \leq Q_{1d=DD1}^* < 40$$

(3) 最大火炎幅呈示位置

図10に示すように、修正火源径 $1(DD_1)$ 基準の無次元発熱速度と最大火炎幅呈示位置の関係を求めると $Q_{1d=DD1}^*$ が5までは $2/5$ 乗に比例した関係を示したが、これ以上の領域では最大火炎幅呈示位置は $Q_{1d=DD1}^*$ に依存せずほぼ一定値となった。これは、火源表面から天井までの領域で最大火炎幅を求めたためで、火炎が長くなるとトンネル天井に衝突する領域近傍で最大火炎幅を示したためと推定される。これらの関係をまとめると式(6)で記述できる。

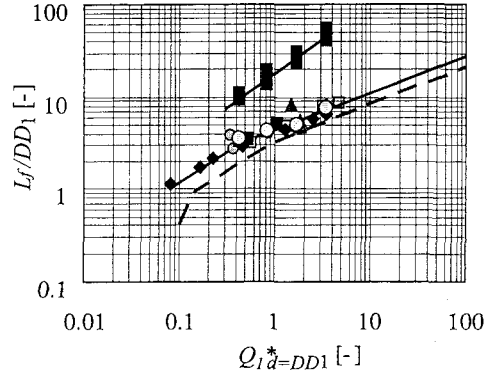
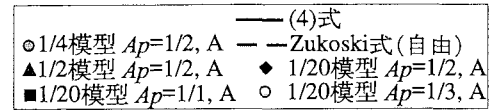


図8 $A_p=1/1 \sim 1/3$ の空間における火炎長さ と 発熱速度 (自然換気時、修正火源径(DD_1)基準)

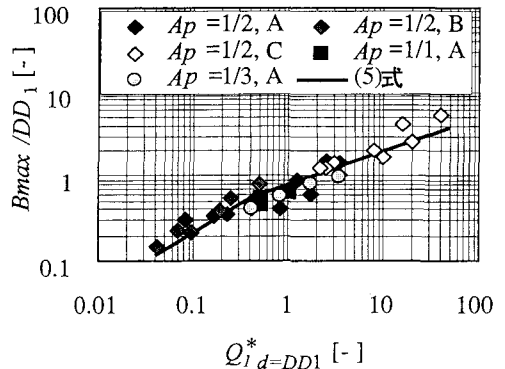


図9 最大火炎幅と発熱速度自然換気時、(修正火源径(DD_1)基準)

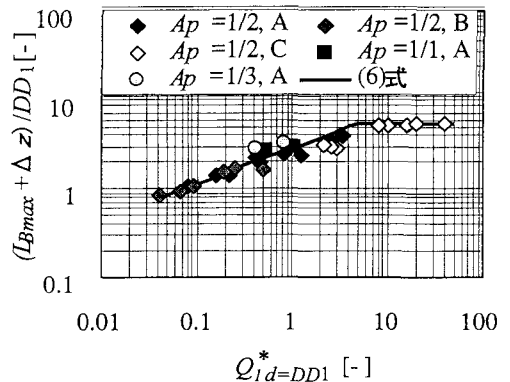


図10 最大火炎幅呈示位置と発熱速度 (自然換気時、修正火源径(DD_1)基準)

$$(L_{B\max} + \Delta z) / DD_1 = 2.8 Q_{1d=DD1}^{*2/5} \quad 0.04 < Q_{1d=DD1}^* < 5 \quad (6)$$

$$(L_{B\max} + \Delta z) / DD_1 = 5.33 \quad 5 \leq Q_{1d=DD1}^* < 40$$

3.4 縦流換気，非接炎時の火炎形状特性

(1) 火炎長さ

高さ 0.3m のトンネル模型実験空間における火炎長さは，火源形状やその大きさにかかわらず，図 11 に示すように無次元発熱速度 $Q_{1d=DD1}^*$ を用いて整理すると， $Q_{1d=DD1}^*$ の 2/5 乗に比例した性状を示した。回帰式を式(7)に示す。

$$L_f / DD_1 = 2.71 Q_{1d=DD1}^{*2/5} \quad (7)$$

(2) 最大火炎幅(長手方向)

最大火炎幅の結果を図 12 に示すように， $Q_{1d=DD1}^*$ の 2/5 乗と相関性を有していた。以下に近似式を示す。

$$B_{\max} / DD_1 = 0.78 Q_{1d=DD1}^{*2/5} \quad (8)$$

(3) 最大火炎幅呈示位置

図 13 に示すように，最大火炎幅呈示位置は， $Q_{1d=DD1}^*$ の 2/5 乗の関数となった。式(9)に近似式を示す。

$$L_{B\max} / DD_1 = 1.43 Q_{1d=DD1}^{*2/5} \quad (9)$$

今回検討した実験範囲では，火炎がトンネル天井に接炎していない場合，縦流換気風速，火源形状の影響が小さいと考えられる。

3.5 縦流換気，接炎時の火炎形状特性

(1) 火炎長さ

火炎長さを求めると，火源形状やその大きさにかかわらず，図 14 に示すように組合せ関数 $Q_{1d=DD2}^* \cdot Fr_{d=DD2}^{-1/6}$ の 2/5 乗に比例した性状を示した。近似式を式(10)に示す。自然換気時よりも $Fr_{d=DD2}^{-1/6}$ だけ縦流換気流の影響を受けることになる。

$$L_f / DD_2 = 3.50 (Q_{1d=DD2}^* \cdot Fr_{d=DD2}^{-1/6})^{2/5} \quad (10)$$

$$1.0 < Q_{1d=DD2}^* \cdot Fr_{d=DD2}^{-1/6} < 30.0$$

(2) 最大火炎幅(長手方向)

最大火炎幅の結果を図 15 に示すように，組合せ関数 $Q_{1d=DD2}^* \cdot Fr_{d=DD2}^{-1/6}$ の 2/5 乗と相関性を有していた。以下に近似式を示す。

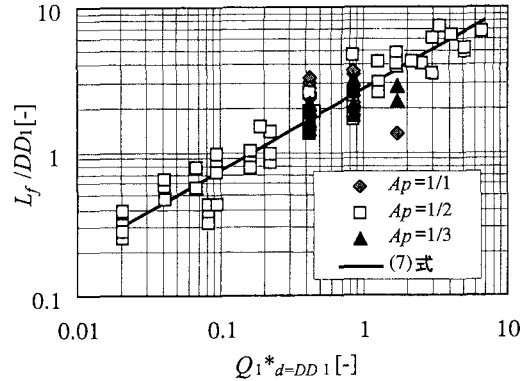


図11 火炎長さと言熱速度
(縦流換気・非接炎時)

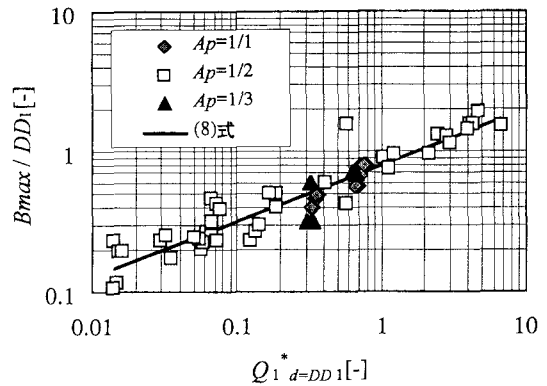


図12 最大火炎幅と言熱速度
(縦流換気，非接炎時)

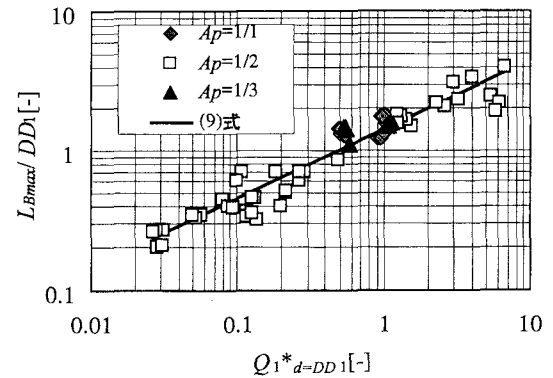


図13 最大火炎幅呈示位置と言熱速度
(縦流換気，非接炎時)

$$B_{\max} / DD_2 = 0.68(Q_{1d=DD_2}^* \cdot Fr_{d=DD_2}^{-1/6})^{2/5} \quad (11)$$

(3) 最大火炎幅呈示位置

図16に示すように、最大火炎幅呈示位置は、組合せ関数 $Q_{1d=DD_2}^* \cdot Fr_{d=DD_2}^{-1/6}$ の2/5乗の関数となった。発熱速度が大きく風速が小さい場合は、自然換気時にみられたように天井衝突部の特性が出ると考えられるが、今回の実験範囲では式(12)のように記述された。

$$L_{B_{\max}} / DD_2 = 1.48(Q_{1d=DD_2}^* \cdot Fr_{d=DD_2}^{-1/6})^{2/5} \quad (12)$$

火炎がトンネルに接炎していない場合に比べ、接炎している場合の方が風の影響を受けやすいという傾向がみられた。

4. まとめ

模型トンネルの縮尺率ならびに火源形状および火源面積を変化させた火災実験から、以下の事項が明らかとなった。

- ①火炎長さについては、自由空間と同様に無次元発熱速度で記述可能で 1/20～1/2 模型間で相似性が確認された。
- ②自然換気時(天井への接炎の有無に関わらず)及び縦流換気時、非接炎時の場合には DD_1 、縦流換気時、接炎時には DD_2 を代表長さとした無次元発熱速度と火炎形状との相関性が高かった。
- ③ $Ap=1/2$ 以下の自然換気時の火炎長さは $Q_{1d=DD_1}^* < 4$ の範囲は2/3乗に、 $Q_{1d=DD_1}^* \geq 4$ の範囲は2/5乗に比例し、最大火炎幅は $Q_{1d=DD_1}^*$ の2/5乗の関数、最大火炎幅呈示位置は $Q_{1d=DD_1}^* < 5$ の範囲は2/5乗の関数で、 $Q_{1d=DD_1}^* \geq 5$ 以上の範囲は約5.3と定数を示し $Ap=1/1$ での火炎長さは $Q_{1d=DD_1}^*$ の3/4乗と長くなっていた。
- ④縦流換気時、非接炎時の火炎形状については、火炎長さ、最大火炎幅、最大火炎幅呈示位置それぞれ同様に $Q_{1d=DD_1}^*$ の2/5乗に比例していた。
- ⑤縦流換気・接炎時の火炎長さとは最大火炎幅は、組合せ関数 $Q_{1d=DD_2}^* \cdot Fr_{d=DD_2}^{-1/6}$ の2/5乗、最大火炎幅呈示位置は組合せ関数 $Q_{1d=DD_2}^* \cdot Fr_{d=DD_2}^{-1/6}$ の2/5乗に比例していた。

謝辞

本実験の実施にあたり当時武蔵工業大学の学生である萩原梢氏、横田裕子氏、ならびに鹿島技術研究所の新井芳明氏、鹿島建設土木管理本部の天野玲子博士をはじめとして関係者の多大なご協力を頂いた事に感謝の意を表します。

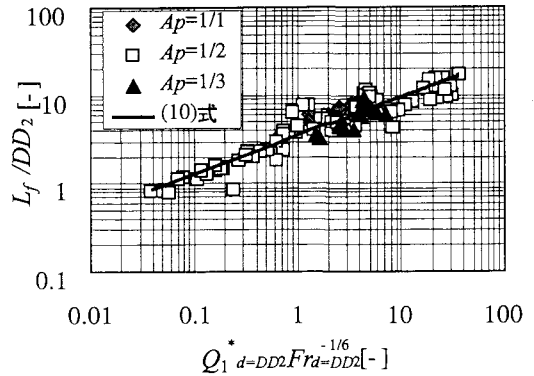


図14 火炎長さと組合せ関数
(縦流換気、接炎時)

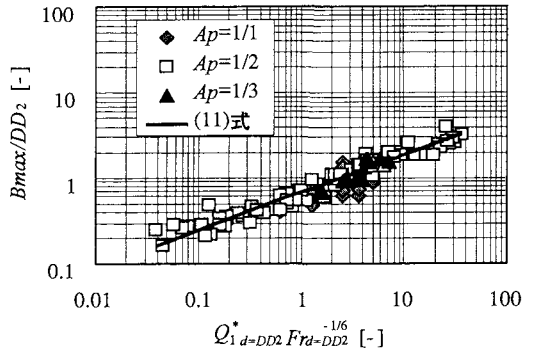


図15 最大火炎幅と組合せ関数
(縦流換気、接炎時)

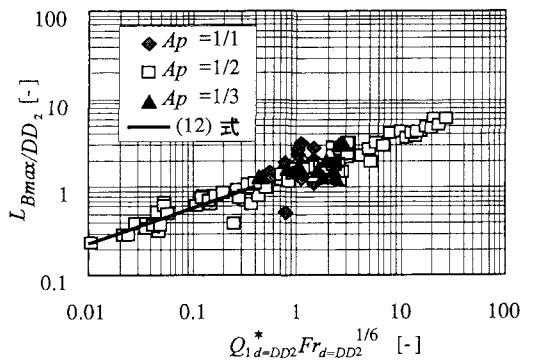


図16 最大火炎幅呈示位置と組合せ関数
(縦流換気、接炎時)

【記号】

A_p :	トンネル断面アスペクト比 (=高さ/幅)	A_f :	火源面積[m]
B_{max} :	最大火炎幅(火炎の中心軸に対し法線方向の幅が最大になる距離、但し、トンネル長手方向の断面方向)[m]		
C_p :	空気の定圧比熱 [kJ/kg/K]	d :	代表長さ[m]
D_0 =	$(D_1 \cdot D_2)^{1/2}$ [m]	D_1 :	トンネル長手方向の火源長[m]
D_2 :	トンネル短手方向の火源長[m]	DD_1 =	$D_2^{3/2}/D_1^{1/2}$ [m]
DD_2 =	$D_1^{3/2}/D_2^{1/2}$ [m]	Fr :	フルード数 ($=U_{wind}^2/(g \cdot H)$)
g :	重力加速度[m/sec ²]	H :	床表面から天井までの高さ[m]
L_{Bmax} :	最大火炎幅呈示位置(火源中心から最大火炎幅を示す火炎軸の位置までの直線距離)[m]		
L_f :	火炎長さ(火源から火炎軸の火炎先端を結ぶ直線距離または火源から天井までの火炎長さとして天井に達してから 250K の呈示位置までの長さを加算した距離)[m]		
Q :	発熱速度[kW]	Q_1^* :	無次元発熱速度($=Q/(\rho_a C_p T_{ag}^{1/2} D^{5/2})$)
R^2 :	相関係数[-]	Q_2^* :	無次元発熱速($=Q/(\rho_a C_p T_{ag}^{1/2} D^2 H^{1/2})$)
U_{wind} :	排煙時の風速[m/sec]	T_a :	外気温度[K]
ρ_a :	外気の密度(給気密度)[kg/m ³]	$\angle z$:	仮想点源距離 ($\angle z/D=2.0 Q^* D^{2/5}$)

【参考文献】

- 1) 栗岡 均, トンネル空間における火災安全に関わる実験的研究, 博士論文, 2004
- 2) 川端信義他, トンネル火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文誌, 65-634B, pp.1870-1877, (1999)
- 3) 山田常圭, 道路トンネルの火災安全と合理的設計法について, 日本火災学会誌火災, vol.48, No.5, pp.1-3, (1998)
- 4) 栗岡 均他, 水平方向に細長い空間における火源近傍性状およびブリューム性状, 建築学会構造系論文集第 546 号, pp.151-156, (2001)
- 5) 栗岡 均他, 自然換気時におけるトンネル空間での熱気流の温度性状, 平成 11 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.298-301, (1999)
- 6) 栗岡 均他, トンネル火災時の火炎性状について(その 2), 平成 12 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.148-151, (2000)
- 7) 桑名秀明他, 中規模トンネルにおける熱気流性状, 平成 11 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.306-309, (1999)
- 8) 天野玲子他, 水幕式火災防炎システムの開発‘水幕の火災区画化特性の把握’, 平成 16 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.392-395, (2004)
- 9) E.Zukoski, Proceedings of the first International Symposium on Fire Safety Science, (1984)
- 10) 田中哮義, 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, pp.71, 76, (1993)
- 11) 日本火災学会編:「火災と建築」, 共立出版株式会社, pp.83-85, (2002)
- 12) 抱 憲誓他, チューブ状空間における火炎性状に関する研究—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—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.191-192, (1999)
- 13) 国兼裕子他, チューブ状空間における火炎性状に関する研究—その 3 ブリューム性状に及ぼすアスペクト比の影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.189-190, (1999)
- 14) 萩原梢他, トンネル火災時の火源近傍性状に及ぼす火源形状の影響, 平成 15 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 218-221, (2003)
- 15) 岡 泰資他, トンネル火災時の火炎傾斜について—火炎が天井に接炎しない場合—, 日本火災学会論文集, vol.51, No.2, pp.55-66, (2001)