

トンネル状空間での火炎形状について

Flame Properties in a Tunnel

栗岡 均^{*}，岡 泰資^{**}，佐藤博臣^{*}，須川修身^{***}

Hitoshi KURIOKA, Yasushi OKA, Hiroomi SATOH, and Osami SUGAWA

Experiments were conducted to understand the effects of a confined space and ventilation on flame properties like flame length, tilt angle and so on. Two types of model tunnel, having square and/or arched cross-section, were employed. The flame length and its tilt angle from normal direction were estimated based on contour maps of temperatures. We proposed new definition method for the flame tilt angle in the confined spaces and compared with conventional one. Models for flame tilt angle and maximum temperature appeared under the ceiling with forced ventilation were presented. Temperatures along the trajectory were compared with those in free boundary.

Key words flame tilt, flame length, tunnel fire, Froude No., Dimensionless heat release rate

1. はじめに

我が国では，昭和47年の北陸トンネル列車火災や昭和54年の東名高速自動車道路日本坂トンネル火災の経験を貴重な教訓とした調査研究や事故解析を踏まえ，列車火災時のマニュアルの制定，道路トンネル非常時用施設設備基準の制定など，法的な整備および車輛の難燃化やトンネル内の防災設備の整備・強化が図られてきた。その結果，大きな事故は発生せず現在に至っている。しかし輸送時間の短縮（高速走行）や輸送量の増大にともなうトンネルの長大化・大断面化への要求により，従来の防火対策では対応しきれない状況の発生もありうると予想される。そこでトンネル火災に対する未然防止の強化とともに拡大阻止の観点からも，空間形状に対応した新規の対策が望まれる。換言すれば，防火技術者に対して新たに火源周辺部の構造駆体および周辺物体への影響とともに，避難・救助活動への影響の把握が要求されることになる。

火災発生時の火炎形状および煙・有害ガスの流動性状に多大な影響を及ぼすと考えられる設備については，交通量とトンネル長さにより設置の有無が定められ，機械排煙を行う場合には縦流換気方式が採用されることが多い。これらのトンネルでは，環境保全や走行の安全・経済性を考慮して，一方通行の場合には車道内限界風速（12m/s）が設定されている[1]。しかし，火災事故発生時には火災発生位置を基準として，進行方向前方の車輛は高温煙の被害に遭わないように，また上流側への高温煙層の遡上阻止のために2～2.5m/sの機械排煙が奨められている[2]。

いずれにしろ，トンネル内には換気による風に加え，周辺の熱環境の変化に伴い，常に風が生じている。近年，強制換気下のトンネル状空間内での火災性状を予測するためにCFDを用いた検討[3, 4]や実験的研究[5-9]も行われつつあるが，より簡便に火災に伴う緒現象を検討できるほど整備されているとは言いがたい。

そこで，トンネル状空間内で発生した火災現象への天井や壁の影響を検討するために，火炎の傾斜角度や

キーワード：火炎傾斜角，火炎長さ，トンネル火災，フルード数，無次元発熱速度

^{*} 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

^{***} 東京理科大学火災科学研究所 助教授

その長さなどの火炎形状だけでなく、トンネル天井下に現れる高温煙層の最高温度やその呈示位置などを含めた火源近傍性状を統一的に記述可能な工学的予測手法の開発を目指し、模型実験を行った。

昨年度はトンネルに代表される半閉鎖空間内で生じる火炎性状を議論する際に Froude モデルで記述出来ることを述べた[10]。本報告では、まず火源周辺部の性状を把握するために、天井直下の高温煙層以外に輻射に多大な影響を及ぼす火炎の長さ、傾斜角度などの火炎の挙動に注目した。取り掛かりとして、火炎高さ、傾斜角度などへの火源規模、天井高さおよび換気速度などの支配変数の把握とその依存性を検討した後、工学的な予測式の提案を試みた。

2. 火炎傾斜モデルの導入

火源周辺部への輻射強度の算出の容易さは、トンネル状空間内で横風を受け傾斜した火炎の主軸位置を如何に表現するかに依存する。そこで、火炎主軸位置のモデル化を以下のように試みた。

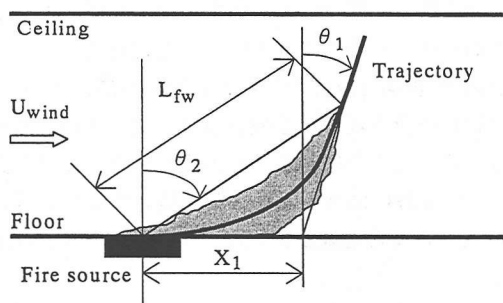
2-1. トンネル状空間での火炎傾斜角度および火炎長さの定義

自由空間において横風を受けた火炎の傾斜角度は、目視や火源近傍の温度分布をもとに火炎先端と火源中心部を直線で結んだ時の床面あるいは法線方向からの角度として定義されることが多い。しかしながらトンネル状空間における火炎の発達状況の観察から、大きく2通りの状況、つまり空間天井への接炎の有無を考慮する必要があることが示唆された。すなわち、接炎しない状況では上記の定義法も適用可能であるが、接炎する状況では、単純に火炎先端と火源とを結んだときの角度(θ_2)により有効に火炎の主軸位置を捉えることは難しいと考えられるためである。

そこで、横風を受けた火炎を伴った熱気流が、床面に沿った流れから上昇流に変化した後の、この主軸の接線と火源表面高さレベルにおいて床面に平行な線との交点における法線方向からの角度を新たに傾斜角度(θ_1)として採用した。因みに火炎先端部の温度としては従来の知見から 250℃を採用した[11]。

また新たな傾斜角度 θ_1 を採用するにあたり、傾斜切片 X_1 を同時に定義した。その他の火炎の長さも含めて、各変数の定義の概略を図1に示す。

(a)接炎しない場合



(b)接炎した場合

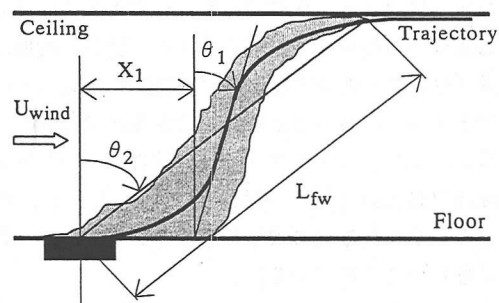


図1 火炎傾斜角度および火炎長さの定義

2-2. 火炎傾斜角度予測モデルの導出

傾斜した火炎の形状を簡易な予測式で表現しようとするならば、火炎性状に対して影響を与える領域とその要因を明確にする必要がある。図1にも火炎のイメージを示したように、横風を受けた火炎の主軸は火源から天井に向かって下流側に弧を描くような形状を示す。

そこでこの傾斜した火炎面において、空間内を通過する平均断面風速および火源からの浮力により生じた上昇速度に基づく質量流束がバランスすると考えると(1)式が成立する。

$$\rho_o \cdot U_{wind} \cdot DH \cdot A_s^{1/2} \propto \rho_f \cdot W \cdot L \cdot A_f^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $A_s^{1/2}$ 、 $A_f^{1/2}$ という長さを導入したが、これらの変数は開口部における縦横比が約 1:1 の半閉鎖空間内での給気風速に対する天井近傍最高温度、最高温度呈示位置および遡上阻止風速の関係から導出したもので[9]、火源径、火源形状、空間の縦横比の検討が残されているのは論を待たない。同様に、傾斜した火炎面を形成する代表長さの拡がりに関しても、初期の火源面積に対する拡がり幅の増分比を検討する事が残されているが、本論では(1)式で代表させた。

(1)式より火炎の傾斜角 (θ_1) の余弦を求めると(2)式が導出される。

$$\cos \theta_1 = \frac{DH}{L} \propto \left(\frac{T_o}{T_f} \right) \cdot \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{W}{U_{wind}} \right) \quad (2)$$

ここで、 T_o/T_f は連続火炎領域、間歇火炎領域およびブルーム領域の各領域毎にほぼ一定値をとると考えられる。さらに、半閉鎖空間内で傾斜した火炎軸に沿った鉛直方向の上昇速度も自由空間での性状が継承されると考えるならば、火源から天井に衝突するまでの火炎熱気流も 3 領域に分類でき[12]、各領域に対して発熱速度と火源からの高さの関数として表現できると考えられる。そこで(2)式に McCaffrey が提案した関係式を代入し、火源表面からトンネル天井までの長さ(DH)を代表長さとして無次元化すると(3)式が得られる。

$$\cos \theta_1 \propto \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^{1/2} \cdot Q^{* \frac{1-2\eta}{5}} \cdot Fr^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

なお本研究ではトンネル天井直下最高温度で 3 領域に分類し、火炎領域は $550^\circ\text{C} < \Delta T_{\max}$ 、間歇火炎領域は $250^\circ\text{C} < \Delta T_{\max} < 550^\circ\text{C}$ 、ブルーム領域は $\Delta T_{\max} < 250^\circ\text{C}$ と定義し、それぞれの領域において $\eta = 1/2, 0, -1/3$ を採ると仮定した。

3. 実験

図 2 に使用した模型トンネルの概要を示す。火源近傍（火源を中心に上流・下流側とも 45cm の範囲には厚さ 10mm の耐火ウールを模型天井に裏打ちした）を除き、厚さ 3mm のスチール製で、断面形状が 0.3m×0.3m の正方形と床面から天井までの高さが 0.32m、最大幅 0.325m、床面での横幅 0.22m の馬蹄形の 2 種類を用いた。なお断面形状に係わらず断面積は 0.09m² で同一である。また模型トンネルの全長は 4.8m と 10.2m の 2 種類を用いた。

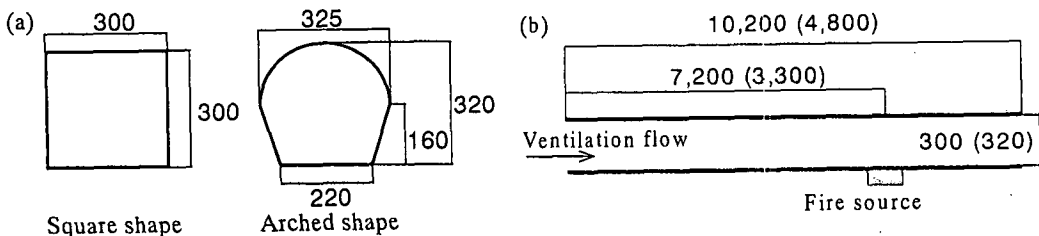


図 2 模型トンネルの概要
(a)断面形状 (b)長手方向の概要

模擬火源として 0.1m×0.1m の正方バーナーを用いた。燃料にはプロパンガスを使用し、流量を 1.0～14.0litre/min の範囲で 6 段階変化させた。これらの流量は火源上に形成された火炎の高さが模型トンネルの高さに対し、有風時において接炎しない状態から接炎する状態までの火源規模に相当する。さらに床面から火源表面までの高さを 0, 6, 12cm の 3 段階変化させた。また縦流換気方式を模擬するために、模型トンネルの片方の開口部に給気用ファンを取り付けた。なお換気流はフィルターを通過させることにより整流された状態でトンネル内に送り込まれる。また下流側に当たる開口部は全面開口とした。給気速度は 0.1～0.96m/s の範囲で 4 段階変化させた。これらの速度はファン出口における垂直速度分布をもとに、この値と微小有効断面積の積の和として得られた給気総風量を模型トンネルの断面積で除した平均断面速度を意味する。

線径 0.65mm の k タイプ熱電対を模型トンネル長手方向中心軸に沿って網目状に張り巡らし、傾斜した火炎により作り出された火源近傍の温度場を計測した。計測範囲は上流・下流側とも火源を中心に 25, 50, 100, 150, 400, 725mm の位置に天井から 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250mm 高さに熱電対を設置した。これらの温度をもとに等温度線を作成し、火炎主軸の傾斜角度およびその長さを読み取った。しかし、発熱速度や換気速度の組み合わせによっては設置した熱電対網よりも火炎先端が遠くまで伸びたときもあり、条件によっては火源形状を読み取れなかった場合もある。なおここで報告する温度は、計測時間を約 10 分とし、準定常状態を示した後半 3 分間の平均温度を意味する。

4. 結果および考察

4-1. θ_1 と θ_2 の関係

火炎主軸の傾斜角度を意味する θ_1 と θ_2 の関係を図 3 に示す。これから、火炎が天井に接炎しない場合、 θ_2 は θ_1 に比べ幾分大きな傾斜角度を示す傾向があるが、 θ_1 と θ_2 には

$$\theta_2 \propto \alpha(\theta_1)^\beta \begin{cases} \text{矩形} & \alpha = 31.3, \beta = 0.20 & \text{相関係数} = 0.9325 \\ \text{馬蹄形} & \alpha = 12.7, \beta = 0.41 & \text{相関係数} = 0.9865 \end{cases} \quad (4)$$

なる関係が成り立つ。一方、天井に接炎した場合には θ_1 と θ_2 の間には明確な相関が認められず、かつ θ_2 で定義される傾斜角度は θ_1 より極端に倒れた結果を与えることから θ_2 で定義される角度で主軸位置を表現すること是不適切であると判断される。そこで以下の傾斜角度に関しては、接炎の有無に係わらず θ_1 で定義される角度を用いて解析を進める。

4-2. 火炎傾斜角度(θ_1)の性状

(3)式で表現された関係式に基づいて整理した結果が図 4 である。これから傾斜角度と Fr および Q^* の組み合わせ変数とには 3 領域を通して整然とした関係が見られ、

$$\cos \theta_1 = 0.74 \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^{1/2} Q^* \frac{1-2\eta}{5} \cdot Fr^{-\frac{1}{2}} \quad 0.15 < \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^{1/2} Q^* \frac{1-2\eta}{5} \cdot Fr^{-\frac{1}{2}} < 1.35$$

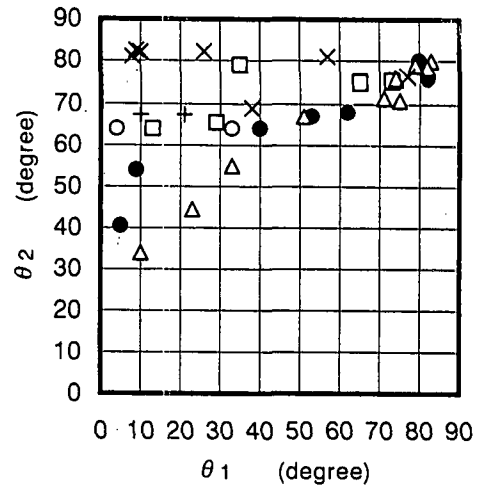


図 3 θ_1 と θ_2 の関係

- 接炎なし、矩形(L=4.8m) × 接炎あり、矩形(L=10.2m)
- 接炎なし、矩形(L=10.2m) ○ 接炎あり、馬蹄形(L=4.8m)
- △ 接炎なし、馬蹄形(L=4.8m) + 接炎あり、馬蹄形(L=10.2m)
- 接炎あり、矩形(L=4.8m)

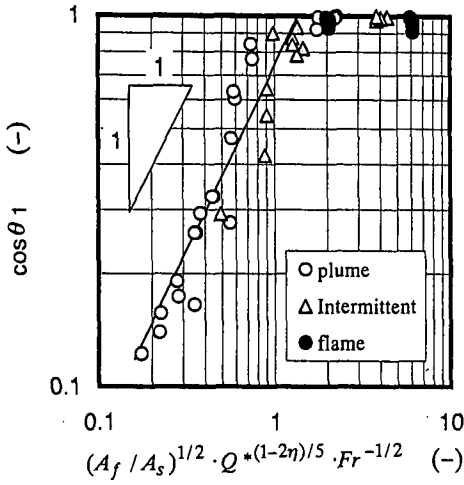


図4 火炎傾斜角度と組み合わせ変数の関係

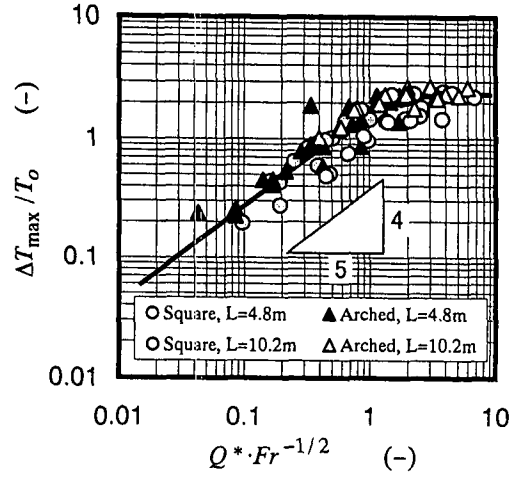


図5 最高温度と組み合わせ変数の関係

$$\cos \theta_1 = 1 \quad 1.35 < \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^{1/2} Q^{* \frac{1-2\eta}{5}} \cdot Fr^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

と表現できる。なお、この結果は火源表面高さを $H=0\text{cm}$ とした場合であり、現時点では(5)式に火源位置の影響が組み込まれた表現式となっていない。ところで、対象とする現象が3領域に分割したどの領域に相当するのかについては、先述したように天井直下に現われる最高温度にて振り分けた。強制換気時のトンネル天井直下最高温度と Q^{*} および Fr の組み合わせ変数には図5に示したような関係が成り立ち、アスペクト比が1:1の断面形状を有するトンネル内では(6)式のように表現できる。

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_o} = \alpha \left(\frac{Q^{*}}{Fr^{1/2}} \right)^{\beta} \quad \begin{cases} Q^{*}/Fr^{1/2} < 1.5, & \alpha = 1.70, \beta = 4/5 \\ 1.5 \leq Q^{*}/Fr^{1/2}, & \alpha = 2.35, \beta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

(5), (6)式から Q^{*} と Fr を入力条件として火炎主軸の傾斜角度が予測可能となった。

4.3. 傾斜切片の性状

自由空間においては、傾斜切片は火源代表長さを基にした Q^{*} , Fr を用いて $Q^{*2/3} \cdot Fr^{1/3}$ を変数に比例関係が認められたが[13], トンネル状空間内ではこの関係は成り立たない。そこで、火炎が床面付近を下流側に這う、水平方向への流れから鉛直方向への流れへと変化するまでの領域において、水平方向へ質量流束と鉛直方向への浮力による質量流束のバランスが崩れ、鉛直方向への成分が大きくなった場合に流れが上昇流に変化すると考えられる。そこでこれら質量流量が一致する距離が傾斜切片(X_1)に相当すると考えると、(7)式が成り立つ。

$$\rho_o \cdot U_{wind}^{1/n} \cdot D \cdot \Delta z \propto W \cdot \rho_f \cdot D^2 \quad (7)$$

ここで $\Delta z \propto D$ なる関係が、またこの領域での速度が U_{wind} の $1/n$ で近似できると仮定すると(7)式は(8)式のように簡略化できる。ただし密度項を温度で表現した。

$$T_f / T_o \propto W / U_{wind}^{1/n} \quad (8)$$

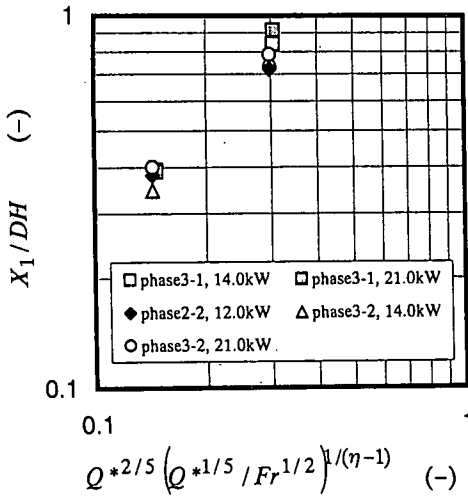


図6 X1と組み合わせ変数の関係(火炎領域)

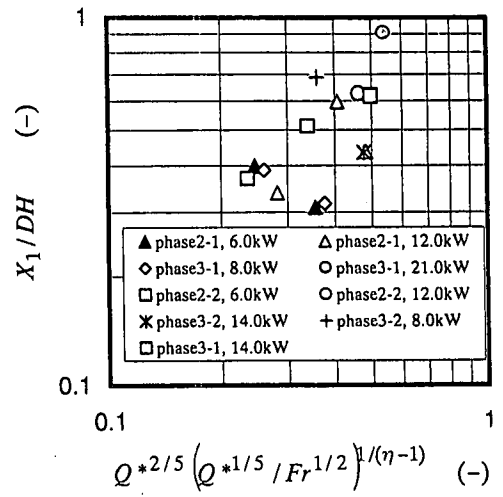


図7 X1と組み合わせ変数の関係(間歇火炎領域)

ここで, McCaffrey が提案 [12] した $W \propto (z/Q^{2/5})^\eta \cdot Q^{1/5}$, $T_f \propto (z/Q^{2/5})^{2\eta-1}$ の関係(8) 式に代入整理すると, (9)が求まる。

$$z \propto (Q^{1/5} / U_{wind}^{1/n})^{1/(\eta-1)} \cdot Q^{2/5} \quad (9)$$

代表長さ(DH)で無次元化すると,

$$\frac{X_1}{DH} \propto Q^{2/5} \cdot \left(\frac{Q^{1/5}}{Fr^{1/2n}} \right)^{\frac{1}{\eta-1}} \quad (10)$$

と表現できる。火炎領域の実験値果をもとに $n=3$ を採るとする。(10)式の関係をもとに火炎領域および間歇火炎領域について実験値を整理すると図 6, 7 に示すように, 比較的良好な相関性が得られた。しかしブルーム領域については, 上昇力が生じている領域で判断し

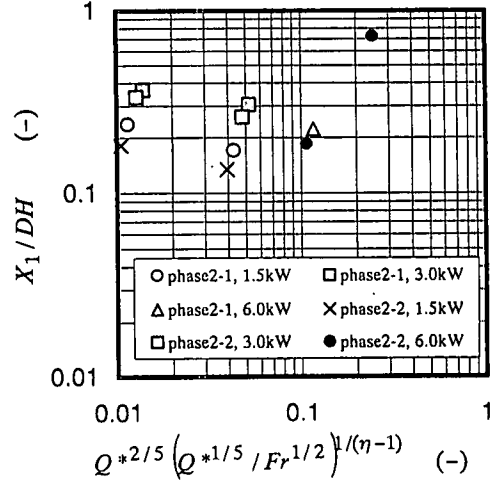


図8 X1と組み合わせ変数の関係(ブルーム領域)

ているため, トンネル内の平均断面風速の影響を強く受けているためか実験値の相関性が悪く, 図 8 に示すように火炎および間歇火炎領域とは異なった傾向を示した。この事は, 接炎しない状況に相当するブルーム領域に対しては, θ_2 で定義される角度で表現する方が取り扱いが容易となることを意味していると考えられる。

4-4. 火炎長さ

接炎していない場合の火炎先端と火源を直線的に結んだときの火炎の長さ(L_{fw})と傾斜した火炎の弧に沿って測定した火炎長さ(L_{lw})の関係を図 9 に示す。これより L_{fw} と L_{lw} の相関は非常に高く, L_{lw} の方が約 5% 長いことが分かる。さらに, 図 10 に示すように, 火源面積基準の Q^*_D に対する火炎の長さの依存性を見ると, 通常自由空間ではこの発熱速度の範囲において, 火炎長さに対する Q^*_D の依存性が変化する境界が存在するが, 今回の実験結果からはこのような依存性は確認できなかった。しかし火炎の長さは概ね Q^*_D の $2/3$ 乗に比例して長くなる傾向を示した。火源表面から天井までの高さ基準の Q^* に対しては, 火炎長さは Q^*

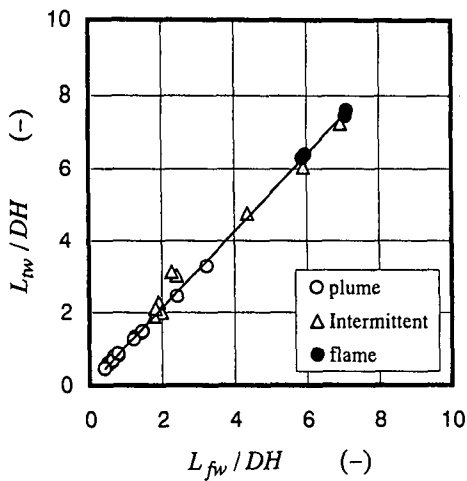


図9 L_{fw} と L_{tw} の関係

の1乗に比例して長くなる傾向を示した。また、換気速度の影響については現在検討中である。

5 まとめ

横風を受けたトンネル断面の縦横比が1:1の空間における火炎の特性として以下の事項が明らかとなった。

- ①トンネル状空間内での火炎主軸の傾斜角度を定義する場合には、単純に火炎先端と火源とを結んだときの角度では不十分な場合もある。そこで、接炎の有無に係わらず火炎軸に沿った接線が火源表面高さレベルとの交点で定義される角度で記述する方が汎用性に富む。
- ② Q^* と Fr を入力値として、火炎主軸の傾斜角度 (θ_1) を予測できる関係式を導出した。なお、この関係式を用いる際に必要となる天井直下の最高温度を予測する関係式も合わせて提案した。
- ③傾斜切片に関するモデル式を提案したが、火炎領域あるいは間歇火炎領域に対してばらつきが見られるものの適用可能である。
- ④火炎の主軸に沿った長さは、火炎先端と火源表面中心を単純に直線近似した長さよりも約5%長い。また、実験範囲では火炎の長さは概ね火源面積基準の無次元発熱速度の2/3乗に比例して長くなる。なお、換気速度の影響については今後の課題である。
- ⑤今後は傾斜した火炎幅の検討の他に、上部高温層からの輻射量と合わせて火源周辺部の輻射量の算法の検討が残されている。
- ⑥トンネル空間断面の縦横比の影響の検討が今後の課題として残されている。

6. 謝辞

実験を行うに当たり、鹿島技術研究所の桑名秀明氏、新井芳明氏にご尽力いただき、ここに感謝の意を表わします。また研究の支援を頂きました横浜国立大学の小川輝繁教授に感謝いたします。

7. 記号

A_s : チューブ状空間の断面積(m^2), A_f : 火源面積(m^2), C_p : 定圧比熱 ($kJ/kg \cdot K$)

D : 火源の代表長さ (m), DH : 火源表面からトンネル天井までの高さ (m)

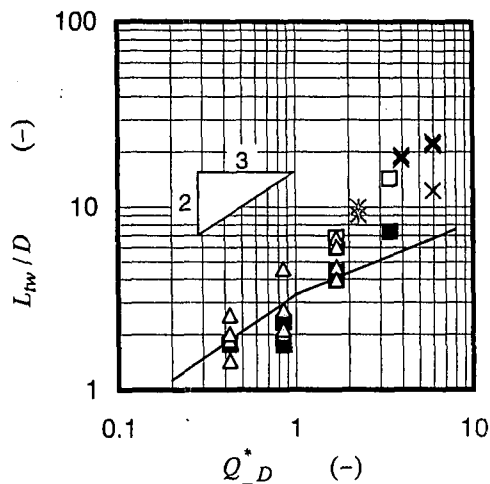


図10 火炎長さと Q^*_D の関係

- Square($L=4.8m$)
- △ Arched($L=4.8m$)
- Square($L=4.8m$, touched)
- △ Arched($L=4.8m$, touched)
- × Square($L=10.2m$, touched)
- * Arched($L=10.2m$, touched)
- Zukoski

g : 重力加速度 (m/sec^2), H : トンネル高さ(m)

L : 見かけの火源中心から最高温度提示位置までの距離(m)

L_{fw} : 250℃の等温度線と火炎軸の交点と火源表面を直線で結んだときの長さ(m)

L_{tw} : 火源表面中央から 250℃の等温度線と火炎軸の交点までの火炎軸に沿った長さ(m)

Q : 発熱速度 (kW), T_o : 雰囲気温度 (K), T_f : 支配的な領域の温度(K)

ΔT : 温度上昇(K), U_{wind} : 平均断面風速(m/s)

W : 支配的な領域の浮力による上昇速度 (m/s), X_I : 傾斜切片(m)

α , β : 実験定数

ρ_o : 雰囲気空気の密度 (kg/m^3), ρ_a : 給気空気の密度(kg/m^3)

ρ_f : 現象の支配的な領域の空気の密度(kg/m^3)

θ_1 : 火炎の主軸に対する接線が火源表面レベルと交差する点における法線からの角度

θ_2 : 250℃の等温度線と火炎軸の交点と火源表面中央とを結んだときの法線からの角度

$$Fr = U_{wind}^2 / (g \cdot DH), \quad Q^* = Q / (\rho_o C_p T_o g^{1/2} DH^{5/2})$$

8. 参考文献

- 1) 八木 弘, 江良嘉宏, 畠中耕三, 鈴木靖亀, 「第二東名・名神高速道路トンネルの換気及び非常施設」, ハイウェイ技術, No.9, pp.218-226, (1997)
- 2) 水谷他, 「トンネル内自動車火災実験」, トンネルと地下, 13, 2, 47, (1982)
- 3) Lea, C. J. "Computational Fluid Dynamics Simulations of Fires in Longitudinally-Ventilated Tunnels", HSL Report No. IR/L/FR/94/10, (1995)
- 4) Kolb, G., Most, J.W. and Torero, J.L., "Simulated Pool Fires Tilted by Wind: Flame Characteristics and Geometrical Considerations", ASME, HTD-Vol.341, National Heat Transfer Conference, Volume 3, pp.19-35, (1997)
- 5) Bettis, R. J., Jagger, S. F. and Macmillan, A., "Interim Validation of Tunnel Fire consequence Models: Summary of Phase 1 Tests HSL Report No. IR/L/FR/94/2, (1994)
- 6) Bettis, R. J., Jagger, S. F. and Macmillan, A., "Interim Validation of Tunnel Fire consequence Models: Summary of Phase 2 Tests HSL Report No. IR/L/FR/93/11, (1993)
- 7) Kuwana, H., Kurioka, H., and Satoh, H., "Scale Effect on Temperature Properties in Tunnel Fire", 3rd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, pp.87-96, (1998)
- 8) 山田常圭他, 「トンネル火災時の換気条件下での煙の遡上に関する実験研究」, 消防研究所報告, 第 83 号, (1997)
- 9) 栗岡 均, 佐藤博臣, 小川輝繁, 岡 泰資, 磯崎英樹, 「チューブ状空間における火源近傍の性状及び限界風速について」, 平成 10 年度日本火災学会研究発表会, pp.212-215, (1998)
- 10) 佐藤博臣, 栗岡均, 須川修身, 岡 泰資; 「地下空間における火災性状に関する研究」, 地下空間シンポジウム論文・報告集 (日本土木学会), vol. 3, pp.73-82, (1997)
- 11) Sugawa, O., Satoh, H., and Oka, Y., "Flame Height from Rectangular Fire Sources considering Mixing Factor", Int. Assoc. of Fire Safety and Science, Proceedings of the Third Int. Symposium on Fire, pp.435-444, (1991)
- 12) McCaffrey, B.J., "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results", NBSIR 79-1910, (1979)
- 13) Oka, Y., Kurioka, H., Satoh, H. and Sugawa, O., "Modeling on Flame Tilt in Free Boundary", 6th International Symposium on Fire Safety Science, in submitting