

大断面トンネルにおける火災熱気流と煙の遡上特性 Backlayering Characteristics of Fire Plume and Smoke in the Large Cross Sectional Tunnel

國兼裕子., 川端信義., 竹國一也..., 下田哲史....

Yuko KUNIKANE, Nobuyoshi KAWABATA, Kazuya TAKEKUNI and Akifumi SHIMODA

This study is a part of the investigation project to examine an emergency ventilation system in tunnels, which have large cross sectional areas, on the New Toumei - Meishin expressway. Backlayering characteristics, which are the most important behavior in case of a fire in longitudinal ventilation system tunnel, are studied by using numerical simulation. Especially, the length of the backlayering in a large cross sectional tunnel is verified. Furthermore, the influence of stopping vehicles on the backlayering characteristics is investigated. The results show that the influence of the vehicles is so large that it shouldn't be ignored.

Tunnel Fire, Fire plume, Smoke, Backlayering Characteristics, Longitudinal Ventilation, Large Cross Sectional Tunnel

1. まえがき

自動車トンネル内における火災事故は、閉鎖空間であるため避難しにくく、かつ発生する煙が天井面を伝って遠方に拡散するなど、明かり部の火災事故に比べて被害拡大の危険性が高い。また、日本の高速道路トンネルは、ほとんどが大都市間を結ぶ都市間トンネルであるため、火災事故が大災害に発展した場合には、長期に渡って物流がストップすることによる経済的な損失も甚大である。トンネル火災事故時の初期対応としては、換気（排煙）設備を使って内部の煙を制御することになっている。トンネル換気設備には、大きく分けて、自動車の走行方向に空気を流す縦流換気方式と、車道と平行に送気および排気ダクトを設け、送気ダクトから排気ダクトへ空気を流す横流換気方式とがある。横流換気方式の火災非常時の対応は、火災発生区間の排煙を最大にし、火点から発生する煙が拡散する前に排気ダクトに吸い込んで排煙するため、火点の上流側も下流側も避難環境の確保ができる点に特徴がある。しかし、排煙量に限界があるため、大規模火災時にはかえって危険性が増すこともある。縦流換気方式では、縦流風によって発生した煙を車両の走行方向に押し流すことによって、火点から上流側の避難環境を確保するとともに、出来るだけ低い縦流風速とすることによって火勢を煽ることなく、かつ下流側にも煙の成層状態を実現し、路面近傍の煙濃度を薄くするこ

トンネル火災、熱気流、煙、遡上特性、縦流換気、大断面トンネル

- * 福井大学大学院工学研究科博士後期課程
- ** 工博 福井大学教授 工学部機械工学科
- *** 日本道路公団 技術部道路技術課 課長代理
- **** 日本道路公団 技術部道路技術課

とになっている。したがって、火点下流側の走行車両が速やかに避難できるように、通常時の渋滞が発生しないことが必要とされる。日本の高速道路のトンネルは、ほとんどが大都市間を結ぶ都市間トンネルでは、渋滞の発生もまれであるため、主に縦流換気方式が採用されている。

このように縦流換気方式の火災非常時換気運用では、煙を下流側に押し流す縦流風速の決定が重要であり、理論的研究^{(1),(2)}、実験的研究⁽³⁾、シミュレーションによる研究⁽⁴⁾など多くの研究がなされてきた。日本では、およそ 2m/s 程度の縦流風速を目標に非常時換気運用がなされてきたが、この値は遡上を阻止する風速ではなく、過去の実験結果では若干上流側に遡上している結果であった。しかしながら、縦流風速 2m/s 前後のいずれの実験でも遡上した煙は天井部のみに存在し路面に降下することなく、避難環境は十分確保できている結果であった^{(5),(6)}。

現在建設中の第二東名・名神高速道路におけるトンネルは、路肩付き 3 車線であり、2 車線トンネルと比較して 2 倍以上の内空断面積を有する大断面トンネルとなっている。このような大断面トンネルにおいては火災時の煙の遡上特性も従来とは異なることが予想されるため、非常用施設の新たな基準づくりが急がれている。これまでも著者の一部が、限られたケースに対してではあるが、大断面トンネルに対する非常時換気の検討を行った結果、2 車断面トンネルに比べて遡上しやすいものの、内空容積が大きい分、蓄煙効果も高く、路面近傍の避難環境はかえって良好であるという結果を得ている⁽⁷⁾。また、大断面トンネルの特殊性を考慮した火災性状や避難環境確保のための排煙風速の確認、水噴霧による効果の確認などの基礎データとするため、実車両及びガソリン火皿による実大火災実験^{(8),(9)}（2001 年 2 月 26 日～3 月 8 日）を行った。著者らはこれらの実大実験に対するシミュレーションを行い、定量的によく一致することを示し、著者らのシミュレーションの予測精度が極めて高いことを確認した^{(10),(11),(12)}。本研究は、火災性状や避難環境確保のための換気運用についてさらに詳細に検討するため、この高精度のシミュレータ⁽¹³⁾を用い、第二東名名神高速道路を対象とした大断面トンネルにおける煙の遡上特性について明らかにすることを目的としている。

また、火点上流側の渋滞車両はトンネル内縦流風に大きな乱れを与え、遡上特性にも大きな影響を与えらると思われ、これまでも遡上特性に関する研究では渋滞車両の影響を考慮した例は見られない。この渋滞車両が遡上特性に与える影響について明らかにすることについても本研究の目的とする。

2. シミュレーションの概要

本研究で用いたシミュレータ⁽¹³⁾では、支配方程式として圧縮性流体に対する連続の式、運動量保存式、エネルギー方程式、状態方程式、煙質量濃度の移流拡散方程式を用いた。ただし、速度場に対してのみ LES 乱流モデルを適用し、温度場、濃度場は 0 方程式モデルとした。密度は温度のみによって変化するとし、圧力による密度変化の影響は無視した。火災による発熱、発煙速度は、燃焼反応は考慮せずに、エネルギー方程式および煙質量濃度移流拡散方程式の生成項として与えた。

トンネルのような閉鎖空間での火災プルームの流動現象を把握するためには、周囲壁への吸熱量を適切に見積ることが不可欠である。本研究では壁へ吸熱された熱は、主に壁と垂直方向に伝わるため、壁に接するセル表面のそれぞれについての 1 次元熱伝導問題を解いて評価した。ただし、このように評価する場合には、気体と壁の熱容量の違いについて配慮する必要があるため、壁内分割幅を空間分割幅より極端に小さくし、空間セルの熱容量と壁内セルの熱容量のギャップを少なくするよう配慮した。

壁でのせん断摩擦応力は、壁面の粗さを 2mm として速度条件に粗い壁の対数条件を適用した。また、路面においては吸熱の影響は無視できるとして断熱条件を適用した。さらに、流入条件は圧力 $p=0$ とし、流出条件には、一様な風速分布を与えた。

数値計算に関しては、時間進行は陽的クランク・ニコルソン法を用い、SMAC 法により連続の式と運動方程式を連立し、移流項スキームは、運動方程式は 4 次精度中心差分、エネルギー方程式は 3 次精度風上差分、

煙濃度移流拡散方程式は1次精度風上差分とし、その他は2次精度中心差分を用いた。

図1にトンネル横断面図、図2にシミュレーション領域の概略を示す。 x, y, z はカーテシアン座標系で、 x は長さ方向（火点を原点）、 y は中央を0とした幅方向、 z は高さ方向（ $z=0$ は床面）である。なお、発熱領域は、水平面積がほぼ火源面積になるようにした。格子分割は既報⁽¹⁰⁾での検討の通りとし、 $\Delta x=0.667\text{m}$, $\Delta y=0.500\text{m}$, $\Delta z=0.406\text{m}$ とした。熱気流成分の発熱速度および発煙速度についても既報の検討⁽¹⁴⁾に準じて与えた。ただし、本研究の検討は煙の遡上距離に関する検討であり時間経過に関する検討は行わないことから、発熱速度および発煙速度は計算開始から一定の値を与えた。トンネル天井・壁の材質は、コンクリート（比熱 879J/kgK 、密度 2100kg/m^3 、熱伝導率 1.11W/mK 、厚さ 700mm ）とし、壁内の熱伝導についても各セルについて1次元熱伝導問題として取り扱った。

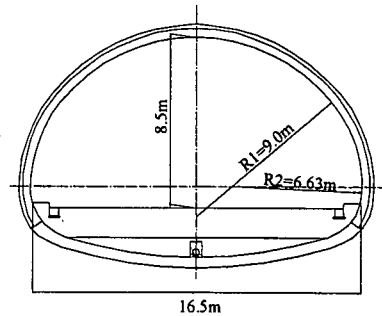


図1 第二東名清水第三トンネル横断面図

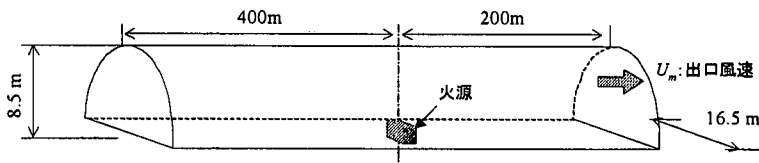


図2 シミュレーション領域概略図

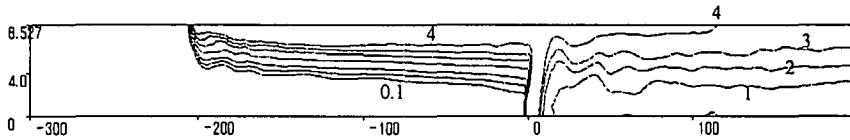
3. 渋滞車両が無い場合の遡上特性

遡上特性として遡上距離 L_b 、遡上阻止風速が挙げられる。遡上距離 L_b の定義は熱気流および煙の先端位置と火点中心との距離であり、遡上阻止風速は L_b を0とする縦流風速として定義されている。本研究では、熱気流は通常時の温度から 10°C 上昇している領域とし、煙領域は、 C_s 濃度で0.1以下の領域とした。

図3(a)は、 4m^2 ガソリン火皿でトンネル縦断勾配0%（この場合を4G-0%と記す）の縦流風速 $U_m=2\text{m/s}$ の場合の計算開始から $t=480$ 秒におけるトンネル中心線の縦断面の煙濃度分布を等濃度線で示した図である。また、図3(b)は、天井中心最上部の極近傍（路面からの高さ $z=8.5\text{m}$ ）の長さ方向の上昇温度分布の時間変化について、横軸に火点を基点とした座標 x 、縦軸に時間 t を取って、上昇温度分布を等温線で示したものである。これらの図から、熱気流と煙は計算開始から遡上を始め、200秒過ぎから先端位置の進行速度が徐々に低下し、400秒過ぎでもわずかに進行することがわかる。500秒以上の計算は計算負荷が大きくなりすぎるため、500秒の時点で計算を打ち切った。したがって、この場合の遡上距離は $L_b=210\text{m}$ とした。また、火点から200mまで区間では天井部に濃い煙層があるものの、この煙が路面近くに降ることはなく、煙層は路面からほぼ3m以上で成層状態を維持している。火点から下流側では天井部の温度は上流側に比べると若干低くなるが、煙層は路面近くでも C_s 濃度が $0.4(1/\text{m})$ 以上であることがわかる。

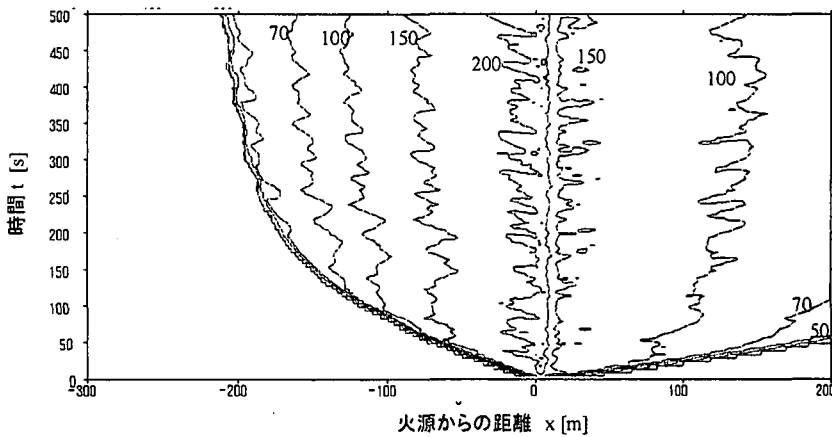
図4は、縦流風速 U_m と遡上距離 L_b の関係を示したもので、 4m^2 ガソリン火皿で縦断勾配が0%の場合と-2%（ x の正方向に下り）の場合（すなわち4G-0%と4G-2%）について示したものである。図から4G-0%、4G-2%、どちらも遡上阻止風速は 4m/s とあまり変わらないが、2%勾配の方が U_m が低下した時の L_b の増加は大きいことがわかる。また、 U_m が低下するにつれて急激に L_b が伸びることがわかる。図中の実線は、 $L_b = a/U_m - b$ の曲線で、 a, b を $L_b > 10\text{m}$ となるシミュレーション結果を用いて最小自乗法によって決定したものである。これから、 L_b と U_m の関係は概ねこの関係で表されることがわかる。

図5は、火皿面積が 4m^2 (4G)と 9m^2 (9G)のときの L_b と U_m の関係について示したものである。縦断勾配は2%である。図から、9Gの方が煙はより遠くまで遡上するが、遡上開始風速 U_s は火源の大きさにあまり影響されないことがわかる。また、9Gの場合も4Gと同様に、 L_b と U_m の関係は $L_b = a/U_m - b$ で概ね表すことができる。



(等濃度線の値, $C_s=0.1, 0.2, 0.4, 1, 2, 3, 4$)

図3 (a) 渋滞車両無しの場合の幅方向中央部縦断面における煙濃度分布
(4G-0%, $U_m=2\text{m/s}$)



(等温度線の値, $\Delta T=10, 30, 50, 70, 100, 150, 200^\circ\text{C}$)

図3 (b) 天井近傍 (高さ8m, 幅方向中央部) の長さ方向温度分布の時間変化
(4G-0%, $U_m=2\text{m/s}$)

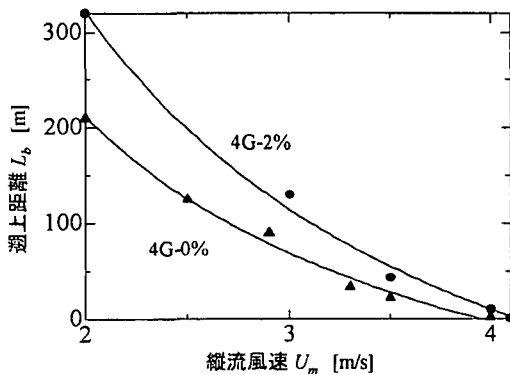


図4 縦流風速 U_m と遡上距離 L_b の関係に対するトンネル縦断勾配の影響
(4m^2 ガソリン火皿, 渋滞車両なし)

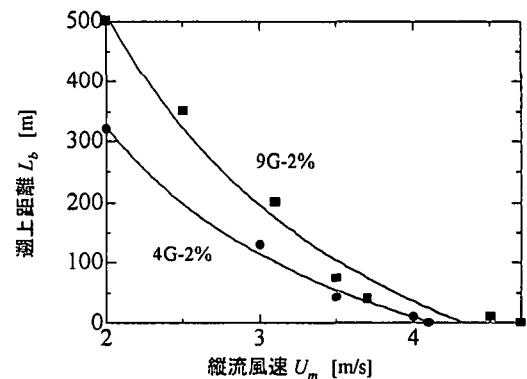


図5 縦流風速 U_m と遡上距離 L_b の関係に対する火源面積の影響
(トンネル縦断勾配-2%, 渋滞車両なし)

本節の始めに、遡上特性として遡上阻止風速があると述べたが、この遡上阻止風速の特定は大変困難であるため、本研究では先の $L_b = a/U_m - b$ の曲線が $L_b = 0\text{m}$ となる U_m を遡上開始風速 U_s と定義することにする。なお、各ケースの遡上開始風速 U_s を表 1 に示す。

表 1 各ケースにおける遡上開始風速 U_s の比較

ケース	4G-0%	4G-2%	9G-2%
U_s	3.95m/s	4.12m/s	4.43m/s

4. 渋滞車両が存在する場合の遡上特性

縦流換気方式で一方通行トンネルの場合、トンネル内火災事故が発生した際には発火点から上流側へ避難するのが一般的と考えられることから、火点の上流側の避難環境を確保することが最も重要である。第二東名名神高速道路においては渋滞の発生はまれと予測している。つまり、火点の下流側の車両は、そのまま出口まで通り抜けることが可能であり、火災時の検討の際に下流側の車両の影響について考慮する必要はないと考える。しかし、風上側は火災により停車している車両が火点付近からトンネル入口まで滞留した状態となることが想定される。このように渋滞している車両（特に大型車）は縦流風に対する障害物となり、気流を大きく乱して煙層の成層状態を崩し、路面近くに煙が拡散することが危惧される。また、遡上特性にも少なからず影響を与えることが考えられる。本研究の検討では、大型車混入率が 30% と 60% の場合を考えるが、乗用車等の小型車は気流に対する障害物としての影響は少ないと考え、シミュレーションでは大型車のみを配置する。図 6 に 30% の場合の配置を示す。60% の場合は第 1 および第 2 走行車線の小型車（点線）をすべて大型車とした配置である。なお、

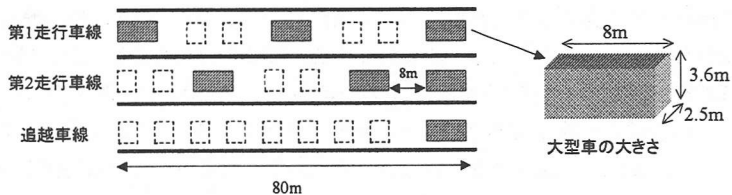


図 6 渋滞車両の配置図 大型車混入率 30%

本節での検討はすべて縦断勾配 0% とした場合である。

図 7 に 4G-0%、大型車混入率 60% で縦流風速 $U_m = 2\text{m/s}$ の場合の中央縦断面における煙濃度分布を示す。図は $t=420$ 秒の時ではほぼ定常状態になった場合（遡上距離およそ 75m）である。図 3 (a) の渋滞車両なしの場合と比べると、遡上距離はかなり短くなることがわかる。この原因として、大型車の存在により気流が流れる断面積が減少して断面平均縦流風速が上昇することと、気流の乱れにより煙層が削られ下流に流されることが考えられる。しかし、渋滞車両がある場合でも路面近傍への煙の拡散はほとんど見られないことがわかる。

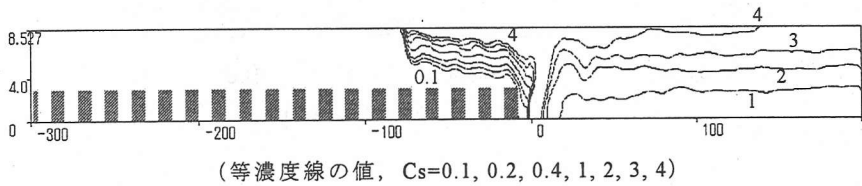


図 7 渋滞車両有りの場合の幅方向中央部縦断面における煙濃度分布 (4G-0%, $U_m = 2\text{m/s}$)

図 8 は大型車混入率が遡上距離に与える影響について調べた結果であり、大型車混入率が 30%、60%について、 L_b と U_m の関係を示した。図から混入率が 30%と 60%では、ほとんど違いが見られないが、図 3 (b)の混入率 0%の場合と比べると L_b が小さく、かつ遡上開始風速も低下することがわかる。これに基づいて、本研究では 60%のみについて検討することにする。また、渋滞車両がある場合の L_b と U_m の関係も、前節と同様の関数で表されることがわかる。

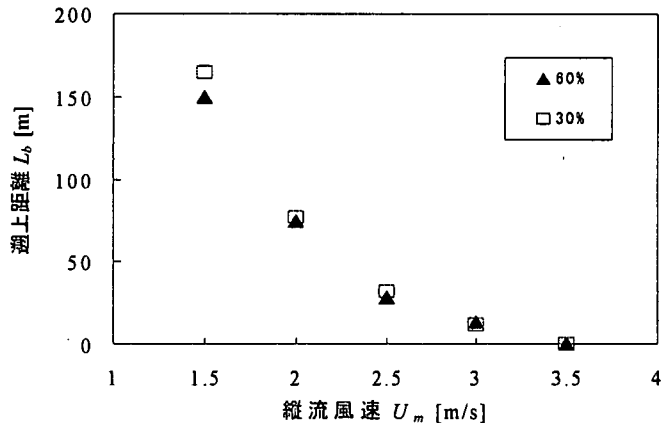


図 8 大型車混入率が遡上特性に与える影響（混入率 60%；30%）

図 9 は、路面高さ $z=1.6\sim 2.0\text{m}$ の範囲および幅方向に平均した煙濃度の長さ方向分布を示し、渋滞車両の有無が避難環境に与える影響について検討した。ここで、避難可能な煙濃度は $C_s < 0.4(1/\text{m})$ とされている。火点の上流側については火源近く（10m 程度）で若干悪化するものの、10m 以上離れると十分な避難環境が確保できることがわかる。一方、火点の下流側については、渋滞車両無しの場合には C_s 濃度は $0.2[1/\text{m}]$ 程度で何とか避難が可能な状況であるが、渋滞車両有りの場合に下流側すべての部分で $0.4[1/\text{m}]$ 以上となることからわかる。また、下流側に進むにつれて濃度が高くなるが、これは煙層が厚くなるためである。

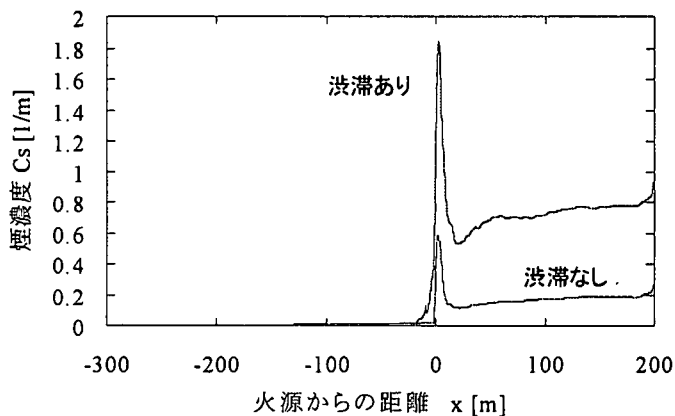


図 9 路面高さ $z=1.6\sim 2\text{m}$ における平均煙濃度の長さ方向変化
（渋滞車両有りと無しの比較）

図 10 に、ガソリン火皿面積が 2m^2 , 4m^2 , 6m^2 , 9m^2 の場合の遡上特性について示した。いずれの火源面積の場合も $L_b = a/U_m - b$ の関係で良く表されることがわかる。係数 a, b の火皿面積による変化を図 11 に示す。横軸は対数目盛りであるが、 a, b ともほぼ直線で表されることがわかる。この直線から求められる a, b を $\bar{a}, \bar{b}$ と表す。図 12 に遡上開始風速 U_s と火皿面積との関係を示す。また、遡上開始風速は a/b であることから、 $\bar{a}, \bar{b}$ の曲線も示した。図から遡上開始風速は火源規模が大きくなるにつれて増加するが、増加の割合は徐々に低下することがわかる。なお、 $\bar{a}, \bar{b}$ の関係からは、火皿面積が 10m^2 の場合は U_s は 3.55m/s , 20m^2 の場合は 3.77m/s と推定される。

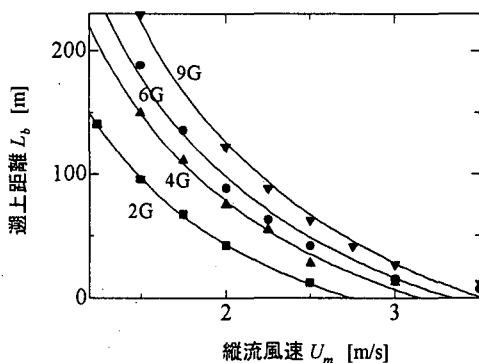


図 10 遡上距離 L_b と縦流風速 U_m の関係に及ぼす火源規模の影響

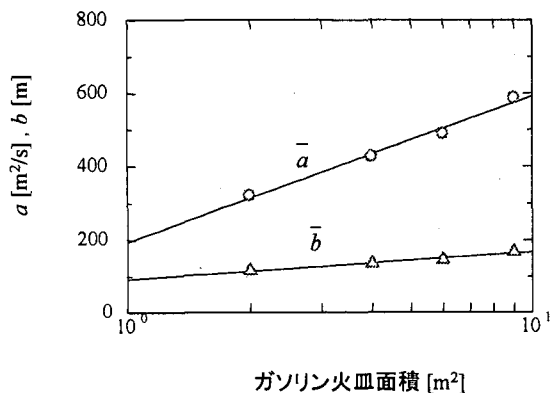


図 11 係数 a, b とガソリン火皿面積の関係

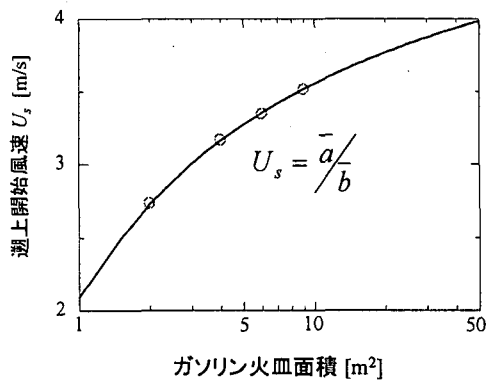


図 12 遡上開始風速 U_s とガソリン火皿面積の関係

5. まとめ

第二東名神高速道路の3車線大断面トンネル内における火災非常時における初期対応としての非常時換気運用の基礎データとなる熱気流の遡上特性について、シミュレーションを用いて検討した。まず、トンネル内に渋滞車両が無い場合について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 縦流風速を低下させると急激に遡上距離が伸びる。
- (2) 遡上距離と縦流風速の関係は、概ね $L_b = a/U_m - b$ の関係で表される。

- (3) 勾配の有無によって臨界遡上阻止風速はあまり変わらないが、いったん遡上すると勾配がある方が、遡上距離が大きくなる。
 - (4) 遡上している場合でも成層状態を保ち、路面近くにまで煙が降下する現象は見られなかった。
- 次に、火点上流側に渋滞車両がある場合について検討した結果、以下のことが明らかになった。
- (5) 渋滞車両の有無によって遡上距離は大きく影響され、有りの方が遡上距離は短い。ただし、大型車混入率による影響は少ない。
 - (6) 渋滞車両がある場合も、遡上距離と縦流風速の関係は $L_b = a/U_m - b$ で表される。
 - (7) 遡上開始風速は渋滞車両の有無によってそれほど影響を受けないが、渋滞車両があるほうが若干低下する傾向となる。
 - (8) 遡上開始風速は火源規模が大きくなるにつれて増加するが、その増加の割合は低下する。
 - (9) 4m^2 火皿火災時において、従来の非常時換気目標縦流風速 2m/s の場合には、煙層の上流側への遡上距離はおおよそ 75m であった。しかしながら、煙層は成層状態を保ち、路面に降下することは無く、路面高さ $z=1.6\sim 2\text{m}$ の視界は良好な状態を維持している。

参考文献

- (1) P. H. Thomas: The Movement of Smoke in Horizontal Passages against An Air Flow, Fire Research Note, No.723, Fire Research Station, Watford, UK, 1968
- (2) J. P. Kunsch: Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel, Fire Safety Journal, 37-1, pp.67-81, 2002
- (3) Y. Oka, G. T. Atkinson: Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safety Journal, 25, pp.305-322, 1995
- (4) 王謙,川端ほか: トンネル火災時の熱気流の遡上を阻止する臨界縦流風速, 日本機械学会論文集(B), 67-56, pp.911-918, 2001
- (5) 建設省土木研究所,道路部トンネル研究室: トンネル内火災実験報告書-縦流換気における火災実験, 1982
- (6) 財団法人高速道路調査会: 道路トンネル内自動車火災における水噴霧設備の調査研究(その 2) 報告書, 1983
- (7) 川端ほか: 第二東名・名神高速道路トンネル火災時の避難環境に関するシミュレーションによる検討, 日本空気調和・衛生工学会論文集 第 74 号, pp.101-111, 1999
- (8) 竹國・下田: 第二東名高速道路清水第三トンネルにおける火災実験, 高速道路と自動車, 44-6, pp.30-35, 2001.6
- (9) 竹國・下田・横田: 大断面トンネルの火災発生時における避難環境評価, 高速道路と自動車, 45-7, pp.66-69, 2002.7
- (10) 國兼・川端ほか: シミュレーション大断面トンネルにおける火災熱気流と煙の挙動シミュレーション, 日本火災研究発表会概要集, pp.96-99, 2002
- (11) 山本・國兼・川端: トンネル内火災時の煙の降下に関する数値, 日本火災研究発表会概要集, pp.104-107, 2002
- (12) Y.Kunikane, N.Kawabata, et.al.: Proceeding of the Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference, Nagoya, 2002
- (13) 川端ほか: トンネル内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, 日本機械学会論文集 (B) , 65-634, pp.1870-1877, 1999
- (14) Y.Kunikane, N.Kawabata, et.al.: Proceeding of Tunnel Fires the Fourth International Conference, Basel, 2002