

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25350474

研究課題名(和文) 自然換気トンネル火災時における換気量の推定と換気の閉じ込め現象の解明

研究課題名(英文) Estimation of the mass flow rate of smoke ventilation and elucidation of the confinement phenomenon of ventilation during a tunnel fire with natural ventilation

研究代表者

田中 太 (Tanaka, Futoshi)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：60401791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本に数多く建設されている全長1 km未満の換気設備を持たない対面通行トンネルを研究対象として、主に以下の二点について明らかとした。(1)発熱速度とトンネル長を与条件として自然換気量を求める理論を構築した。実験によって理論の予測精度を検証した結果、自然換気量は約20%の相対誤差で理論的に予測することができた。(2)火点から坑口に向かって流動する煙について、煙層先端部の温度や流速などを推定する理論を構築した。この理論により煙層降下点を予測でき、換気の閉じ込め現象が生じる時間や位置を推定可能である。本研究で開発した理論は、トンネルの安全な管理や避難安全設計に応用できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the aim was to develop a theory to predict the mass flow rate of smoke under natural ventilation and the position of smoke descent, furthermore, to elucidate the confinement phenomenon of ventilation. First, we developed a new theory to predict the mass flow rate of smoke in a tunnel fire. The relative error between the mass flow rate of smoke predicted by our newly developed theory and that measured during the fire experiment was within about 20%. Next, a new model of a tunnel fire was developed to predict the front smoke temperature, front velocity. The newly developed theory was accurate enough to predict for experimental results. These theories developed in this study can be applied to safe management of tunnels and evacuation safety design.

研究分野：火災安全工学

キーワード：トンネル火災

1. 研究開始当初の背景

日本は山岳地帯が多く、世界有数のトンネル大国である。現在世界的にみてもトンネル火災研究の主流は、「換気システムによる安全な排煙、防煙、そして避難」に力点が置かれている。ところが、これまでに日本に建設されてきたトンネルの多くは全長 1 km 未満の対面通行トンネルであり、換気システムが設置されていないトンネルも多い。トンネル内で火災が発生した場合、高速道路などの一方通行トンネルならば、火点からトンネル入口側に向かって車両渋滞が発生し、避難者はトンネル入り口側に向かって避難すると予想される。そのため、換気システムによって煙をトンネル出口側に押し流すことで、避難者の安全性を確保することができる。一方、対面通行トンネルの場合は、火点の両側に車両渋滞が発生し、避難者はトンネルの両側坑口に向かって避難すると予想される。そのため、煙をトンネル内に無駄に拡散させないために換気設備は通常停止させる方法が用いられる。この場合、トンネル内部は自然換気状態に置かれている。しかしながら、トンネル火災の分野では、自然換気下の換気状態や煙の流動形態あるいはその降下点位置が明確になっておらず、防災上大きな課題として残っている。

2. 研究の目的

本研究では、日本に数多く建設されている全長 1 km 未満の換気設備を持たない対面通行トンネルを対象とした。このような小型トンネルにおいて火災が発生した場合を想定し、以下の二点を研究目的とした。

(1) 自然換気下における換気量の推定

トンネル内で発生した火災の発熱速度とトンネル長さを与条件として、トンネル坑口を通じた自然換気による換気量を推定する理論を構築する。更に構築した理論を検証するために模型実験を実施し、理論による推定値と実験値を比較して、理論の推定精度を検証する。

(2) 自然換気下における煙降下点の推定

火点から坑口に向かって流動する煙について、煙層先端部の温度、流速の値を推定できる理論を構築する。更に理論の結果を実験値と比較して、構築した理論の推定精度を検証する。

3. 研究の方法

(1) 自然換気下における換気量の推定

理論の構築：理論を構築するにあたって、まずはどのようなモデルを取り扱うのかを考える必要がある。図 1 にトンネルの模式図を示す。トンネルの長さは $2L$ でトンネル断面は幅 B 、高さ H の長方形断面を取り扱った。また、火源の発熱速度は $2Q$ で、そのときの

空気層、煙層、プルーム(火源直上にできる熱気流)の質量流量をそれぞれ m_a 、 m_s 、 m_p とし、さらにトンネル底面から煙までの高さを煙層高さ S と定義する。なお、煙層高さはトンネル内のどの位置においても一定とした。本研究では無風状態のトンネルを想定しているため、熱気流流動の対称性を考慮し想定した半分の規模の火源をその閉鎖壁近傍に設置することで、火災時の片側の状況のみを取り扱った。その壁をここでは対称壁と呼び、その幾何学的関係を対称条件と呼ぶ。図 2 に対称条件を考慮した片側トンネルを示す。対称条件によって火災も半分にする必要があるため、発熱速度はもとの半分になることに注意する。なお、対称壁の吸熱については無視するものとする。トンネルの内外で気体の密度が異なると、浮力による圧力差が生ずる。図 3 にそのときの分布を示す。このトンネル坑口における圧力差からベルヌーイの式に基づいて煙の質量流量を推定し、同時に火源の巻き込みによる煙の質量流量を考慮し、双方を同時に満たす煙層高さを推定した。

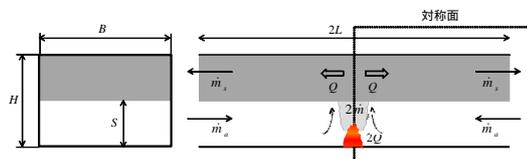


図 1 無風状態におけるトンネル

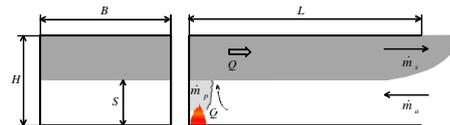


図 2 対称条件を考慮した片側トンネル

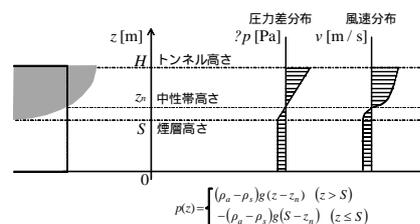


図 3 トンネル坑口における圧力差分布と風速分布

模型トンネル：図 4 に製作した実験装置の外観及び模式図を示す。トンネルは、幅 0.25 m、高さ 0.25 m の正方形断面であり、長さは 2 m、4 m、6 m でそれぞれ実験を行った。火災による燃焼生成物を回収するため、トンネル坑口にフードを設置し、ファンによってダクトを通して外部に排出する。天井直下の煙の温度を測定するために熱電対を設置し、煙に含まれる O_2 、 CO_2 、 CO の体積分率を測定するためにガス濃度計を用いた。厚さ 0.035 m の ALC 材(熱伝導率 $0.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)をトンネルの素材として用いた。ALC 材は又セルト数が実際の

トンネルと近い値をとるため、モデルスケールのトンネル火災実験から実大スケールの火災を想定したり、比較することができる利点がある。

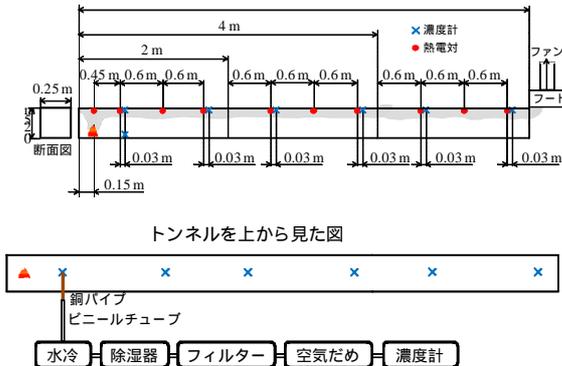


図4 換気量実験装置の模式図

理論で求めた中性帯高さ、煙層高さ、質量流量の予測精度を実験によって確かめる。質量流量については、トンネル坑口の風速と温度を風速計で測定して計算により求めた。なお、測定はサンプリングタイム 1 s、測定回数 60 回で行い、その 60 s の平均を測定値として用いた。図5に具体的な測定位置を示す。風速計の仕様上 60 以上では使用できないため、新鮮空気層の部分の風速だけを測定し、質量保存則に基づいて煙の質量流量を推定した。トンネル幅方向中央の位置をトンネル底面から順に高さ方向に測定した。風速が 0 m/s になった位置を中性帯高さとして風速測定を終了した。風速が 0 m/s にならない場合は風速が最小となった位置をもとに線形近似を用いて中性帯高さを定めた。本研究では、トンネル内における大型車の火災を想定した。発熱速度とトンネル長さを与条件として、トンネル内が準定常状態になるまで予熱した後測定を行った。表1に実験条件を示す。

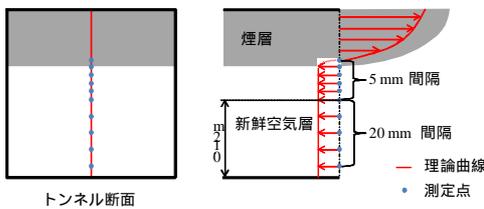


図5 風速の測定位置

表1 実験条件

Test number	気温 t [°C]	発熱速度, Q [kW]	無次元発熱速度, Q* [kW]	トンネル長さ L [m]	無次元トンネル長さ L* = 2L / H [-]
1	28			2	16
2	14	3.5	0.10	4	32
3	13			6	48
4	32			2	16
5	14	4.2	0.12	4	32
6	6.1			6	48
7	29			2	16
8	14	5.7	0.16	4	32
9	12			6	48

(2)自然換気状態における煙降下点の推定
理論の構築：本研究で推定した煙降下の原理について述べる。火災時、火源周辺にある新鮮空気は火災によって引き寄せられ、燃焼物

から発生する燃焼ガスと混ざり燃焼する。このとき新鮮空気は熱煙気流になり、ガス定数は R_a から R_s へ変わる。仮に熱煙気流が冷やされて、熱煙気流の温度 T_s が周辺空気の温度 T_a と同じ温度になったと想定する。このとき、式(1)で示す様に熱煙気流の密度 ρ_s は周辺空気の密度 ρ_a よりも、空気の質量流量に対して燃焼ガスの分だけ大きくなる。

$$\rho_s = \left(\frac{\dot{m}_a + \Delta \dot{m}}{\dot{m}_a} \right) \rho_a, \quad T_s = T_a \quad (1)$$

理想気体の密度は絶対温度に反比例する。したがって、煙の温度は同じ密度のとき新鮮空気の温度よりも高くなる。これが煙層が降下を始める温度 T_{cr} であり、このときの周辺空気に対する上昇温度 T_{cr} を以下に示す。

$$\Delta T_{cr} = \frac{p}{R_s \rho_a} - \frac{p}{R_a \rho_a} = \beta T_a, \quad \beta = \frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}_a} \quad (2)$$

は膨張率を示し、圧力 p は変化しないと想定する。熱煙気流の温度は周辺への伝熱によって減少し、やがて臨界温度 T_{cr} に達する。このときに煙の密度は周辺空気と等しくなり、煙は降下する。また、煙が降下するときの煙の温度 T_{cr} は周辺空気の温度 T_a より高くなる。この煙降下温度を判定基準として、煙層先端部について、エネルギー保存則に基づいて、煙層先端部の温度判定を行い、煙層降下地点を推定した。本研究で構築した理論では、煙層からトンネル側壁を伝って途中降下する煙の質量流量に関しても、質量保存則に基づいて考慮し、煙層先端部の温度に関連させている点に特徴がある。

模型トンネル：トンネル火災時に発生する煙流動について、その先端部のみに着目し、煙層先端部の流動形態と温度変化を追跡することで、煙降下点位置を推定する理論を構築した。更に構築した理論を検証するために模型実験を実施し、理論の予測精度を検証した。図6に模型トンネルの外観及び模式図を示す。模型トンネルは、幅 0.25 m、高さ 0.25 m の正方形断面であり、全長は 12 m である。天井直下の煙の温度を測定するために K 型熱電対をガラス棒で固定して設置した。トンネル側面と天井、底面に厚さ 0.035 m の ALC 材を使用した。ただし、煙流動の可視化のために片側側面と底面の中央部分には耐熱ガラスを用いた。

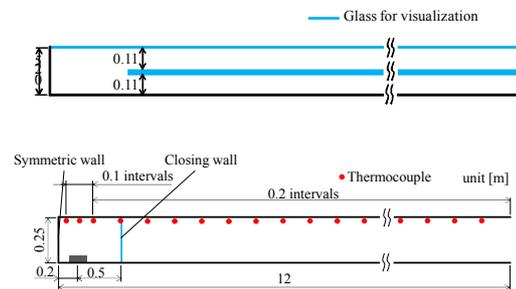


図6 煙降下実験装置の模式図

4. 研究成果

(1) 自然換気下における換気量の推定

計測した風速分布をもとに自然換気で得られた質量流量を求めた。表2に質量流量の理論値と実験値、その相対誤差を、図7にトンネル長さとの関係を示す。表2中の発熱速度は、燃料であるプロパンガスの質量流量から完全燃焼を仮定した上で計算した。表2の±と図7の矢印はそれぞれの不確かさ区間を示している。表2から理論値と実験値の相対誤差は約20%に収まっているが、Test number 9だけ相対誤差が46%であった。図7からも緑の円で囲まれた値のみが不確かさの区間から外れてしまっていることが分かる。これはトンネルが長くなることによって十分な酸素の供給ができなくなり、本来出力されるべき火源の発熱速度が抑制されてしまったためと考えられる。つまり、燃料は十分にあるのに酸素が足りないということである。それを立証するために別の視点から発熱速度を導出する。その際に用いたのが酸素消費法である。表3にその結果を示す。Q = 3.5, 4.2 [kW]においては、プロパンガスの質量流量に基づく方法と酸素消費法では同じ発熱速度が得られた。しかし、Q = 5.7 [kW]では酸素消費法で導出した発熱速度のほうが小さな値となった。このことから、トンネル長さ6m、発熱速度5.7 kWの実験では、換気支配型燃焼となっていた可能性が示唆された。

表2 質量流量の理論値と実験値の比較

Test number	発熱速度, Q [kW]	質量流量(理論), $\dot{m}_a \times 10^{-2}$ [kg/s]	質量流量(実験), $\dot{m}_a \times 10^{-2}$ [kg/s]	相対誤差 [%]
1	1.1	1.1	1.3±0.1	18
2	3.5	1.1	1.4±0.1	22
3	1.1	1.1	1.2±0.1	6.0
4	1.2	1.2	1.5±0.1	21
5	4.2	1.2	1.3±0.1	4.7
6	1.2	1.2	1.4±0.1	9.5
7	1.4	1.4	1.8±0.1	22
8	5.7	1.4	1.7±0.1	17
9	1.4	1.4	0.97±0.1	46

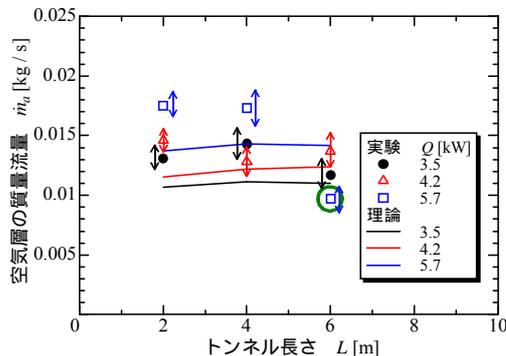


図7 トンネル長さとの関係

表3 酸素消費法による発熱速度

Test number	発熱速度, Q [kW]	発熱速度(酸素消費法) Q' [kW]
3	3.5	3.5
6	4.2	4.2
9	5.7	4.3

(2) 自然換気下における煙降下点の推定

煙層先端部の温度や移流速度の時間に対する変化に関して、図8に上昇温度、図9に移流速度を比較した。プロット点と実線はそれぞれ実験値と理論値を示す。この図から温度も移流速度もいずれの発熱速度においても実験値と理論値は概ね一致した。本研究で開発した理論は実際の煙降下現象を再現しているものと考えられる。

煙層が床まで完全に降下した後は、坑口が煙で塞がれてしまうため、換気の閉じ込め現象が発生した。この現象が発生すると、火源の窒息が生じ、トンネル内部の一酸化炭素濃度の急増と酸素濃度の急減、及び火源から炎が浮き上がり少しでも酸素が多く存在する領域に動き出すゴーストフレイム現象が発生した。図10にゴーストフレイム発生時における火源の写真を示す。炎が赤の点線で示した火源上には存在せず、別の場所へ移動していることがわかる。このときの火源近傍の酸素濃度を図11に示す。酸素濃度は換気の閉じ込め現象が発生した後、急激に低下し、14%近くまで低下している。この実験結果に基づくと、換気の閉じ込め現象は逃げ遅れた避難者にとって非常に危険であり、いつ閉じ込め現象が発生するのかを予測することは大変重要であることがわかる。本研究で開発した煙層降下理論は、換気の閉じ込め現象が発生する時間を煙層降下時間以降として予測可能であり、トンネルの安全管理や避難安全設計に応用できる。

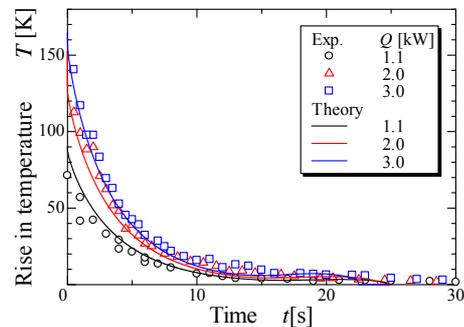


図8 煙層先端部温度の時間変化

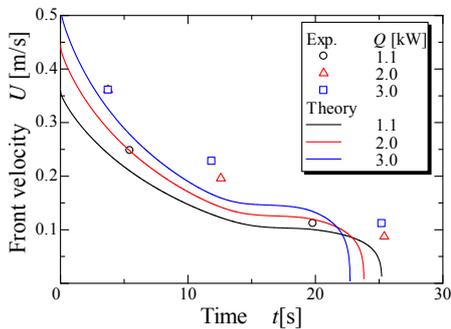


図9 煙層先端部の移流速度



図10 ゴーストフレイム現象

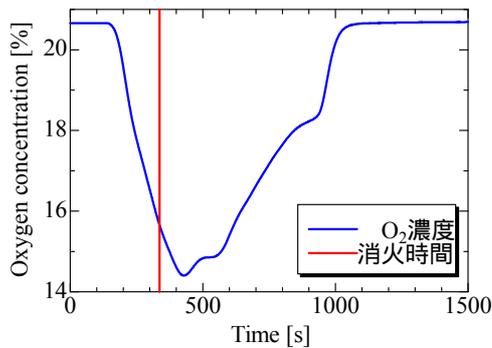


図11 ゴーストフレイム発生時の酸素濃度

5. 主な発表論文等 〔学会発表〕(計4件)

Kazuki Fukaya, Takashi Kato, Koichi Sasaki, and Futoshi Tanaka, Development of a technique for establishing a pseudo tunnel length, 2016 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering (ISAMPE2016), 2016年10月28日, 福井大学(福井県).

Koichi Sasaki, Kazuki Fukaya, Daichi Yajima, Futoshi Tanaka, and Khalid Moinuddin, Flow characteristics of a buoyancy-driven transient ceiling jet in a tunnel fire, 2015 International

Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering (ISAMPE2015), 2015年11月20日, 上海(中国).

Daichi Yajima, Koichi Sasaki, and Futoshi Tanaka, Comparison of correlations with measurements of front velocity of buoyancy-driven transient ceiling jet in a tunnel fire, 2014 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering (ISAMPE2014), 2014年11月28日, 釜山(韓国).

Daichi Yajima and Futoshi Tanaka, Movement of buoyancy driven smoke flow in a tunnel fire, 2013 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering (ISAMPE2013), 2013年11月15日, 福井大学(福井県).

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 太(TANAKA, Futoshi)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号: 60401791