

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01292

研究課題名（和文）自然換気トンネル火災時における燃焼効率推定モデルの開発

研究課題名（英文）Development of combustion efficiency model in natural ventilation tunnel fires

研究代表者

田中 太（Tanaka, Futoshi）

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：60401791

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、トンネル火災における燃焼効率について実験的に調査した。トンネル長をパラメータとしたとき、燃焼効率はトンネル長の影響をほとんど受けないことを明らかとした。ただし、トンネル延長が十分に長くなると、煙が途中降下して汚染空気を形成し、これが火源へ逆流した。その結果、火源の周辺環境は酸素不足状態となり、ゴーストフレイム現象が観察され、最終的には自己消火した。汚染空気に囲まれた火源では、その化学発熱速度は通常の半分以下に減少したが、その燃焼効率は94%と高いことが明らかとなった。最後に、CFDシミュレーションを実施し、煙の逆流によって引き起こされる火源の窒息消火を再現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、トンネル延長や煙流動形態によって、トンネル火災における燃焼効率が受ける影響について明らかとした。特にトンネル延長が長くて煙の逆流が発生しているときの燃焼効率を推定できたことには価値がある。この煙流動と関係づけられた燃焼効率こそが、実際にトンネル火災が発生し、避難が行われている最中における燃焼効率に相当する。本研究は、これまで無視されてきた煙流動と燃焼効率の関係にも着目し、今までトンネル防災の枠組みの中で表面化してこなかった新たな問題を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Combustion efficiency in tunnel fires was measured using a 1:20 scale model tunnel. The results showed that combustion efficiency was little affected by tunnel length, and average values were 89% for propane fires and 80% for heptane fires, respectively. In the case of a long tunnel, descending smoke and backflow of air vitiated by mixing fresh air with descended smoke occurred, and the fire was completely surrounded by vitiated air. In this vitiated fire condition, a ghosting flame was observed close to the fire, and ultimately the fire self-extinguished due to lack of oxygen. In the vitiated fire, the chemical HRR of the fire decreased to half or less than in the normal fire, but combustion efficiency was 94% for heptane fires. Furthermore, numerical simulation was conducted by using the Fire Dynamics Simulator. The FDS reproduced the suffocation extinguishing of the fire caused by the backflow of smoke.

研究分野：流体力学

キーワード：トンネル火災

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、世界中の国々において、人々の経済活動を支える道路ネットワークの一部として数多くのトンネルが建設されている。これらの道路トンネルでは、交通事故及びそれに付随して発生する車両火災に備えて、通報・警報設備、消火設備、換気設備、そして避難誘導設備などの非常用設備が設けられている。特殊閉空間である道路トンネル内において火災が発生すると、避難者とトンネル躯体に対して致命的な被害をもたらす可能性がある。これを防ぐための非常用設備を設置する基準を定めるにあたり、最も重要なパラメータは火災規模を表現する火源の発熱速度である。現在、日本のトンネル防災基準では、火源として大型バス火災に相当する 30 MW の火源が想定されており、これに基づいて避難安全性が検討されている。しかし、実際の火災においては、トンネルの長さ、換気条件、および煙流動形態に依存して燃焼効率が変化するため、トンネル火災実験ごとに燃焼効率を推定する必要がある。このように燃焼効率の問題は、大きな課題として残っているが、現在のトンネル防災の枠組みの中では無視され続けているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、トンネル長さ、換気条件、および煙流動形態を重要なパラメータとして、トンネル火災時における火源の燃焼効率を調査することを目的とした。

3. 研究の方法

第 1 ステージ (平成 29-30 年度): 図 1 に本研究で使用した模型トンネルの模式図を示す。模型トンネルは実大トンネルの 1/20 スケールとして設計され、全長は 12 m、高さ及び幅は 0.25 m、アスペクト比は 1 である。火源としてはプロパンガスバーナーを使用した。トンネル坑口に設置されたフードで燃焼ガスの収集を行い、酸素消費法による発熱速度測定を行う。燃焼効率 χ は、酸素消費法による正味の化学発熱速度 Q_{chem} と質量減少速度に基づく理論発熱速度 Q_{th} との比から計算した。第 1 ステージでは、トンネル長さ L をパラメータとして、定常燃焼時における燃焼効率の変化について実験的に調べた。

第 2 ステージ (令和 1-2 年度): 図 2 に示すように、トンネル火災において煙降下による換気の閉じ込め現象が生じているときの燃焼効率の非定常変化を明らかにした。換気の閉じ込め現象が生じているときは、煙は坑口から排煙されないため、煙をフードで収集することができない。そのため、降下煙による閉塞を考慮した新しい酸素消費法を開発し、発熱速度を推定した。

第 3 ステージ (令和 3 年度): 第 2 ステージで明らかとなった換気の閉じ込め現象時に発生する火源の窒息消火現象について数値シミュレーションによって調べた。

4. 研究成果

図 3 に第 1 と第 2 ステージを通して得られた燃焼効率を示す [1, 2]。縦軸は燃焼効率 χ 、横軸はトンネル長さ L をトンネル高さ H で規格化した無次元長さ L^* である。第 1 ステージでは、模型トンネルの長さを 2 m から 12 m まで変化させて燃焼効率を測定した。これは実大スケールで 40 m から 240 m のトンネルを調べたことに相当する。火源としてプロパンガス火災を利用したとき、8 m の長さまでは燃焼効率はほぼ一定となった。また、トンネル長さが 10 m を超えると、模型トンネル内部で煙降下が生じ、トンネル内において換気の閉じ込め現象が発生することから、火源が異常な燃焼状態になり、模型トンネル内にてゴーストフレイム現象が発生することが明らかとなった。第 2 ステージでは、火源としてヘプタンプル火災を用いた模型実験を実施した結果、燃焼効率はトンネル長さによってほとんど影響を受けず一定値になることが明らかとなった。これは第 1 ステージにおけるプロパンガス火災を用いた実験結果と一致する。ただし、燃焼効率の値は、プロパンガス火災の場合は 89%、ヘプタンプル火災の場合は 80% であった。燃焼効率はトンネル長さによる影響を受けないが、燃焼効率の値は燃料などの影響を受けるものと推定された。以上の結果は、火源からトンネル坑口までの長さがトンネル高さの 40 倍程度までの場合に得られた。トンネル長さがこれ以上長くなると、トンネル内で煙が降下し、閉塞状況を形成する。従来の酸素消費法はこの降下煙による閉塞を考慮していないため、閉塞状況での化学発熱速度が推定できず、燃焼効率が推定できなかった。本研究では降下煙による閉塞を考慮した新しい酸素消費法を開発し、閉塞状況における燃焼効率を明らかにした。図 4 に換気の閉じ込め現象が発生するトンネル長さが 12 m における発熱速度の非定常変化を示す。着火後、234 秒からゴーストフレイムが発生し、320 秒において窒息消火した。さらに、開発した酸素消費法で推定された発熱速度・質量流量・酸素濃度の時間変化と、実験中に観察された物理現象の観測時刻の照合により、開発した酸素消費法の妥当性が十分に高いことを示した。

第 3 ステージでは、これまでの実験結果を再確認しつつ、実験的な研究に加えて、トンネル内の煙流動や燃焼状態に対する数値シミュレーションに取り組んだ。使用した計算コードは米国 NIST によって開発された Fire Dynamics Simulator (FDS) である。プロパンガス火災における FDS によるシミュレーション結果を実験結果と比較すると、天井の温度分布は火源直上を除いては定性的定量的によく一致した。火源近傍だけは非定常乱流火災を解像するだけの十分な計算格

子を使用することができず、過大なサイズの格子セルで計算した結果、温度分布が平均化され、温度が低く見積もられている。模型実験ではトンネル全長が 12 m のとき、換気の閉じ込め現象が発生し、火源は窒息消火に至る。数値シミュレーションにおいても、この窒息消火現象を再現することができた。図 5 に窒息消火直前のトンネル内部の中心断面場の酸素濃度分布を示す。トンネル全長は高さに対して 1/4 に縮尺してある。黒い領域は酸素濃度 13% を示しており、火源が吸い込む空気に含まれる酸素濃度は十分に低く、窒息消火することがわかる。プロパンガス火源を用いた数値シミュレーションでは、窒息消火に至るまでの時間は 180 秒程度であった。

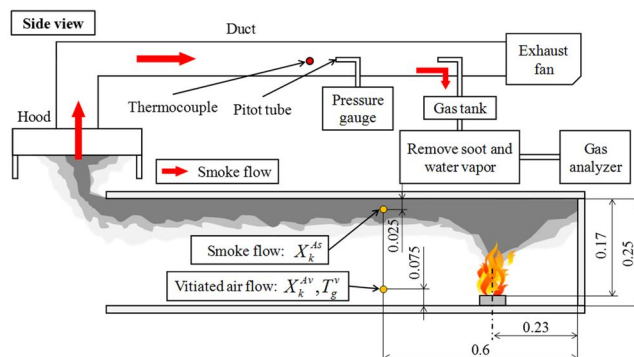


図 1 実験装置

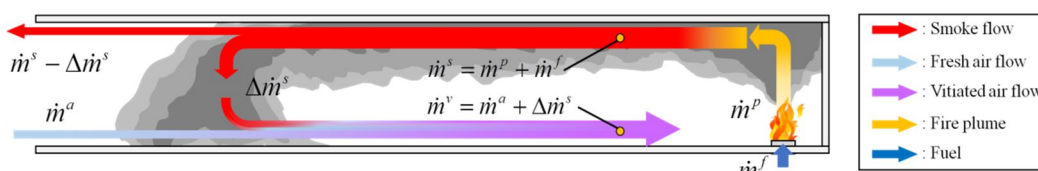


図 2 煙降下による換気の閉じ込め現象

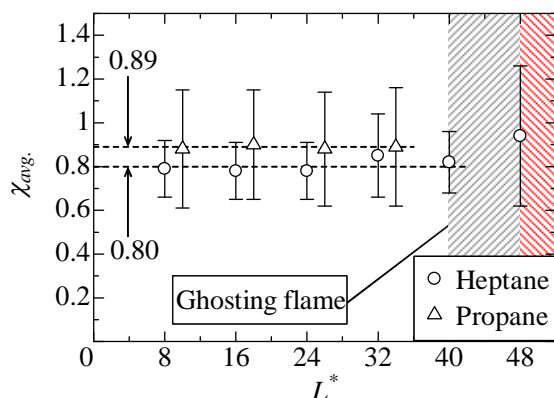


図 3 燃焼効率

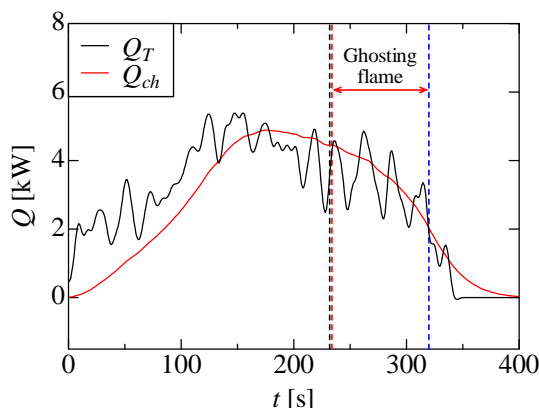


図 4 発熱速度の非定常変化

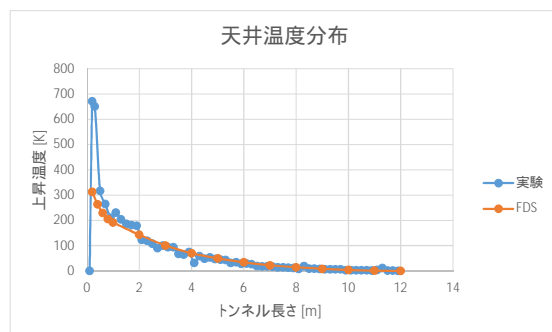


図 5 天井温度分布の比較

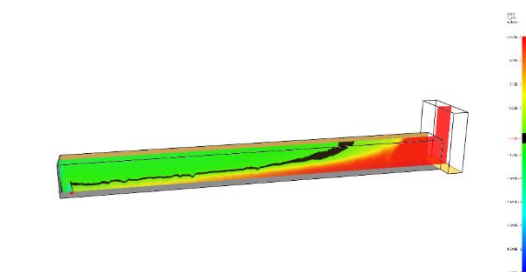


図 6 酸素濃度分布 (窒息消火直前)

参考文献

- (1) T. Ishikawa, K. Kasumi, F. Tanaka, Effects of tunnel length on combustion efficiency in tunnel fires, Proceedings of 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (2019) 1075–1088.
- (2) Ishikawa, T., Kasumi, K., Tanaka, F., Moinuddin, K.A.M., Available online 5 May 2020. Combustion efficiency during fires in tunnels with natural ventilation by vitiated air including descending smoke. Fire Saf. J. 120, 103093.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishikawa Tasuku, Kasumi Keita, Tanaka Futoshi, Moinuddin Khalid A.M.	4. 巻 In Press
2. 論文標題 Combustion efficiency during fires in tunnels with natural ventilation by vitiated air including descending smoke	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 103093 ~ 103093
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.firesaf.2020.103093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tasuku Ishikawa, Keita Kasumi and Futoshi Tanaka
2. 発表標題 Effects of tunnel length on combustion efficiency in tunnel fires
3. 学会等名 The 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (11th AOSFST) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------