

Study on Early Detection of Smoke in Tunnel Fire

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-07-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00062853

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博士論文要旨

煙によるトンネル火災の早期検知に関する研究

Study on Early Detection of Smoke in Tunnel Fire

金沢大学大学院 自然科学研究科

機械科学専攻

学籍番号 1624032012

氏名 鈴木 直也

Abstract

When a fire breaks out in a road tunnel, it is important to secure a safe evacuation environment, and for that purpose, reliable early fire detection is required. In order to enable the detection of smoke in the early stage of the fire before ignition, smoke sensors, laser gas sensors, and photodiode sensors with different detection methods were selected, and the qualitative correlation between smoke concentration and each sensor output was confirmed in preliminary experiments. However, the detection characteristics of each sensor were investigated by a smoke cylinder and pan fire experiment in a full-scale tunnel. As a result, it was found that within the scope of this experiment, each sensor has the possibility of early detection of fire at the smoldering stage before ignition. In particular, the photodiode sensor suggests the possibility of early fire detection regardless of the smoke color, because the smoke enters the bird's-eye view even before the smoke reaches the sensor installation location.

第1章 序論

平成30年の国内の火災発生状況は年間で約38,000件発生しており、1日に104件発生していることになる。建物火災が全体の54.7%を占めており、車両火災は9.6%で2番目に多い。平成30年の道路トンネル内の火災は25件発生しており、近年10年間の平均より若干少ない程度であった。

世界の主要都市では環状道路の整備が進んでおり、世界の主要都市では計画している環状道路の整備が概ね終わっている。これに対し日本の首都圏環状道路の整備状況は少し遅れており、首都圏の3環状道路の整備率は85%にとどまっている。

大都市近郊の高速道路では大深度の長大トンネルが計画されており、急こう配・急カーブ・分合流などの道路構造、接続道路の交通状況や交通量の増大による渋滞の発生などが想定され、山岳トンネルに比べると要避難者が増加すると考えられる。このようなトンネル内では火災発生時に安全な避難環境を確保することが必要となる。安全に避難するためには、より早期に火災を検知して避難を促す必要があると考えられる。

日本の道路トンネルでは炎検知型の火災検知器が標準的に設置されているが、2019年の「道路トンネル非常用施設設置基準」の改定を受けて新たな検知手法採用の選択肢が増加した。炎検知型の火災検知器より早く火災を検知するには、炎発出前の火災初期の段階である「くすぶり期」での検知が有効であると考えられる。本研究では、高速道路トンネルにおける火災の早期検知に着目したセンサを選定し、センサの有効性および早期検知の可能性について実験をとおして明らかにすることを目的とする。

第2章 センサの選定と煙中での出力特性

火災の早期検知のためには「くすぶり期」で発生する煙粒子、有害ガス濃度や周囲光量変化を検知する3つの方法が考えられ、それぞれの物質や周辺状況の変化を捉える3つのセンサを選定した。

選定した煙センサ(SS)、レーザガスセンサ(LGS)、フォトダイオードセンサ(PDS)の3つのセンサの煙中での出力特性について、予備実験として模型トンネル内で排出される煙濃度の異なる燃料を燃焼させ、発生した煙の中でのセンサ出力値を計測した。エタノール、n-ヘプタン、灯油を燃焼させた煙を模型トンネル内に一様に拡散させ、選定した各センサの出力値と同時に計測したCs濃度との相関を確認した。SSは周辺空気の流動が少なくセンサ内に煙が取込まれなかったため、検証から除外したが実用化されているセンサのため、第3章のトンネル内風速を与えたケースで確認することとした。また、エタノールを燃焼させたケースでは、煙の発出量が少なく信頼性の高いデータが取得できなかった。LGSならびにPDSは、n-ヘプタン及び灯油を燃焼したケースで、センサの出力値とCs濃度に定性的な相関があることを確認した。

第3章 実大トンネルAにおける火災実験

第2章の予備実験で各センサの煙濃度との相関が確認されたため、実物大のトンネル内で実際の火災を想定した火災実験を行い、トンネル頂部に一定間隔で縦断方向に設置したCs濃度計の反応状況と選定した各センサの反応状況を比較して煙の到達や周辺状況の変化を捉えることができるかを確認した。火災の設定は、1m²火皿でn-ヘプタンを燃焼させて炎が発出するケース（くすぶり無し）と火災初期のくすぶり期を想定した発煙筒による発煙のみのケース（くすぶり有り）とし、トンネル内風速は2m/sと0m/sの計4ケースとした。

くすぶり無しの風速2m/sのケース（Case1-1）でのCs濃度計と各センサの反応状況の一例を図-1～図-3に示す。トンネル頂部に設置したCs濃度計とトンネル壁面の照明付近に設置したSSの反応では、煙がSSの設置位置トンネル横断方向に拡がるまでの時間遅れがあった。Cs濃度計と同じ位置に設置したPDSの反応は火点の炎の明るさを捉えてCs濃度計よりも早く反応した。トンネル横断方向の高さ4.5mに設置したLGSの反応はCs濃度計とほぼ同時に反応した。

くすぶり無しの風速2m/sのケース（Case2-1）でのCs濃度計と各センサの反応状況の一例を図-4、図-5に示す。Cs濃度計とSSの反応を比較すると、発煙筒の煙は浮力が僅かで2m/sの風速に押し流されたため、トンネル頂部に達するよりも横断方向に拡がる方が早く、先にSSが反応した。PDSでは、煙がセンサ付近に到達していなくても煙によりPDSが受光する光量の変化があり早く反応した。しかし、当初はPDSの周辺に煙が到達するとPDSの受光量は減少すると考えていたが、煙の光幕現象により受光量が増加する状況であったため、煙の濃淡によるPDSの検出特性を確認する追加実験を行うこととした。LGSは発煙筒の煙にほとんどCO₂が含まれず反応しなかった。

各センサの反応開始時刻を比較して、図-6、図-7に示す。Case1-1では、SSは炎検知型の火災検知器と同等に反応した。PDSは火点から離れた地点でも火点の炎の明るさを捉え、早期に反応した。LGSは炎検知型の火災検知器よりも早く反応した。Case2-1ではSS、PDSともにCs濃度計に煙が達する前に反応した。火災検知器は炎が発出していないため当然検知していない。以上より選定した各センサは早期に火災を検知できる可能性があることが確認できた。

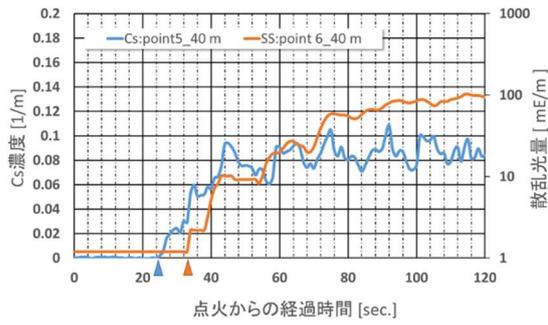


図-1 SS と Cs 濃度計の計測結果
(Case1-1 火源から 40m)

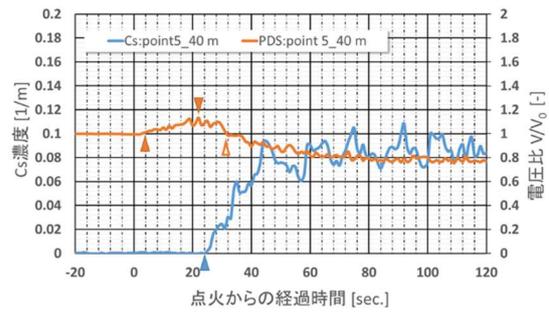


図-2 point5 の PDS と Cs 濃度計の
計測結果(Case1-1)

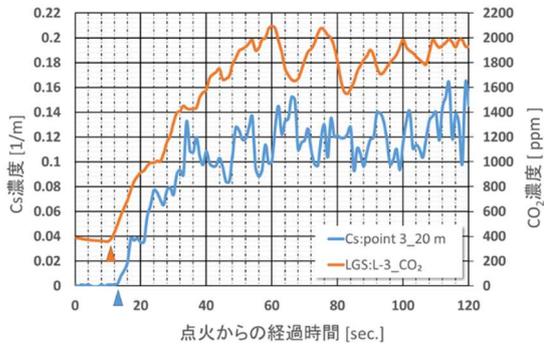


図-3 LGS 横断 (L-3) と Cs 濃度計の
計測結果(Case1-1)

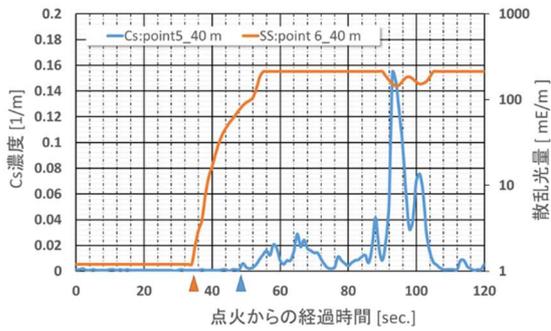


図-4 SS と Cs 濃度計の計測結果
(Case2-1 発煙源から 40m)

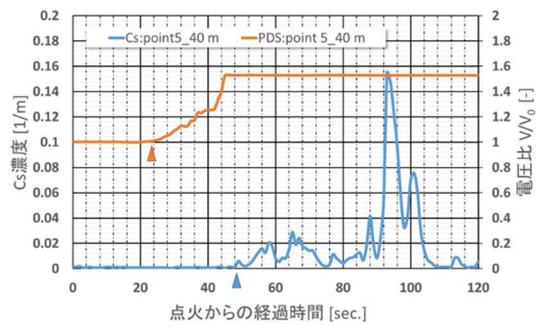


図-5 point5 の PDS と Cs 濃度計の
計測結果(Case2-1)

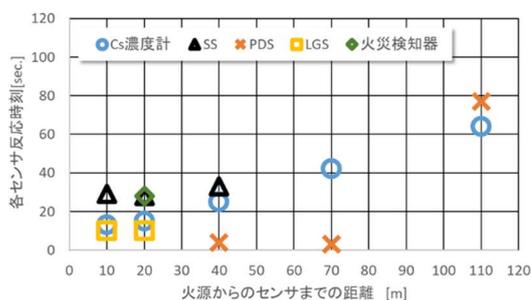


図-6 センサ位置と反応時刻 (Case1-1)

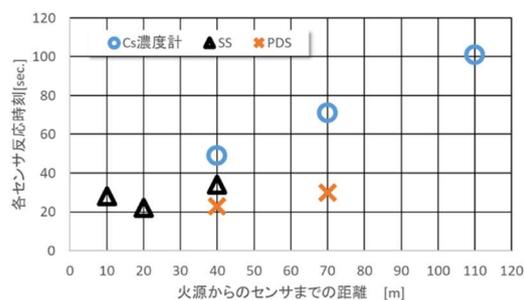


図-7 センサ位置と反応時刻 (Case2-1)

第4章 実大トンネルBにおけるPDSの煙色による検出特性実験

第3章の実験においてPDSの反応状況が当初想定した挙動と異なったため、その条件を想定し煙色の違い（白色煙と黒色煙）による検出特性を確認した。発煙位置を中心にトンネル縦断方向にCs濃度計、PDSおよび熱電対を配置して、無風下のくすぶり期を模擬した白色煙または黒色煙を発生させ、各センサの反応状況を確認した。また暫定的な火災検知の閾値を設定して、検知状況を確認した。

図-7、図-8に発煙位置から-5m地点のCs濃度計およびPDSの反応状況を示す。図-7の白色煙のケースでは、Cs濃度計の反応とほぼ同時にPDSの電圧比は上昇した。これはPDSの受光量が増加したことを示す。図-8の黒色煙のケースではCs濃度計の反応とほぼ同時にPDSの電圧比は下降した。これはPDSの受光量が減少したことを示す。どちらのケースともセンサ付近に煙が到達してCs濃度計が反応すると同時にPDSも反応していることから、PDSの電圧比変化の絶対値を捉えることで煙の到達を判断できることが分かった。

各センサの検知時刻のまとめを図-9、図-10に示す。PDSの検知時刻と熱電対の検知時刻を比較すると、発煙源から15m以内では検知時刻の差は20秒以内であるが、-35m以上になると90秒程度遅れる。これは、熱はトンネル壁面などに吸収され急激に温度が下がるが煙は壁面などへの付着は少ないため、無風条件下で火災初期の小さな熱源と少量の発煙状況下では、熱気流の拡がりよりも煙の拡がりの方が早く検知する場合があることが分かった。

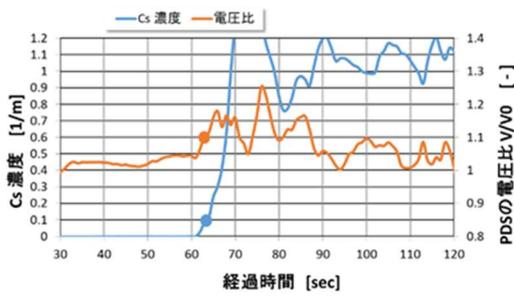


図-7 Cs濃度とPDSの電圧比の変化
(白色煙 point5 発煙位置から-5m)

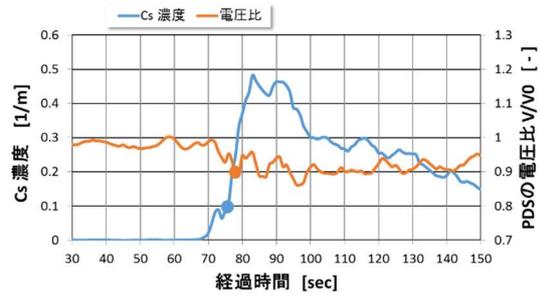


図-8 Cs濃度とPDSの電圧比の変化
(黒色煙 point5 発煙位置から-5m)

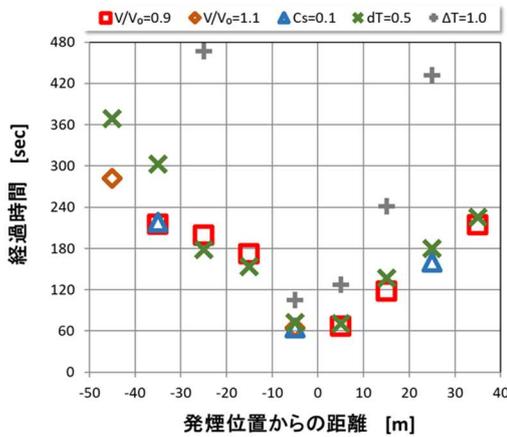


図-9 センサ位置と煙到達までの時刻
(白色煙)

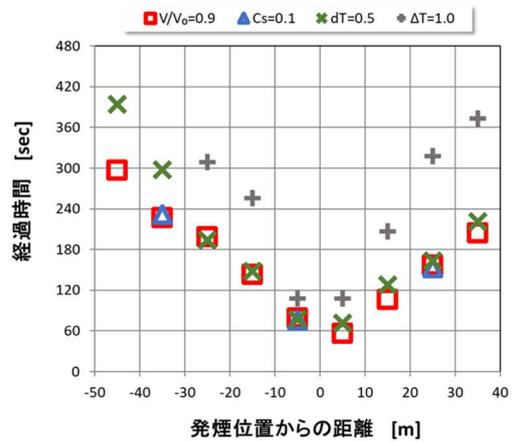


図-10 センサ位置と煙到達までの時刻
(黒色煙)

第5章 結論

トンネル火災の早期検知を実現するために選定したセンサの検出特性と早期検知の可能性について、本研究にて得られた知見をまとめた。SS は炎検知型の火災検知器とほぼ同時に検知し、センサ内に煙が取込まれれば確実に検知できる。LGS は計測延長が長いため、SS や炎を捉える火災検知器よりも早く反応した。PDS は他のセンサとは異なる検出特性が把握された。このため、更に煙色（黒色と白色）による検出特性確認実験を行った結果、黒色煙では電圧比は減少、白色煙では電圧比は増加する場合があります、それらはCs濃度変化とほぼ同時であることを確認した。よって、PDS は煙色に関わらず俯瞰している範囲の受光量変化の絶対値を捉えることで煙の到達を早期検知できることを確認した。また、専用の光源が不要で、センサ付近に煙が到達していなくても受光光量の変化から煙の到達を検出でき、火災の早期検知に有効であると言える。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

煙によるトンネル火災の早期検知に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 鈴木 直也

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、令和3年1月28日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について検討を加え、同日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、協議の結果以下の通り判定した。

トンネル内での火災事故は避難距離が長い上に、大型車両火災は大規模火災に発展しやすく、早期の避難開始が求められることから火災の早期検知は重要な技術である。本論文は、トンネル火災の早期検知の実現を目的に、既存の煙検知器（SS）、火山ガスの検知に用いられているレーザーガスセンサ（LGS）と本論文で新たに提案するフォトダイオード（PD）の3つのセンサを選定し、実大トンネル火災実験により煙の検出特性と早期検知の可能性について検討したものである。実験の結果、SSとLGSはセンサ位置に煙が到達することで検知するのに対し、PDは必ずしも煙が到達しなくても検知可能という特徴を有することを明らかにしている。また火災前のくすぶり状態を模擬した実験により、PDはSSよりも早く反応し、早期検知センサとしての可能性を有することを明らかにしている。さらに温度センサとの比較により、PDは火源からの距離による減衰が少なく、火源から離れていても検知可能であることを明らかにしている。

本論文によって火災初期のくすぶりの段階の早期検知を可能にするセンサの可能性が示されており、道路トンネル火災安全性の向上に大きく貢献しうると考えられる。したがって、工学的な寄与が大きく、博士（工学）の学位に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印）合格・不合格

(2) 授与学位 博士（工学）