

# 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	<a href="http://hdl.handle.net/2297/00062854">http://hdl.handle.net/2297/00062854</a>

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



# 博 士 論 文

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

主任指導教員 児玉 昭雄

提出年月 2021年1月6日

# 目次

1. 序論	1
1.1 火災の発生状況と検知方法	1
1.1.1 火災の発生状況	1
1.1.2 火災の検知方法	2
1.2 道路トンネルでの火災対応	3
1.2.1 都市部の高速道路の状況	3
1.2.2 道路トンネルの特徴	5
1.2.3 道路トンネルでの火災対応設備の設置	7
1.3 本研究の目的と概要	9
1.3.1 本研究の目的	9
1.3.2 検討手順フロー	11
1.3.3 本研究の概要	12
2. センサの選定と煙中での出力特性	13
2.1 緒言	13
2.2 センサの選定	14
2.3 センサの予備実験	20
2.3.1 実験の概要	20
2.3.2 実験装置の概要	21
2.3.3 実験ケースの設定	24
2.3.4 実験結果とセンサの出力特性	25
2.4 考察	29
3. 実大トンネル A における火災実験	30
3.1 実験の概要	30
3.2 実験装置の概要	31
3.3 実験ケースの設定	33
3.4 実験結果	35
3.4.1 Case1(くすぶり期無し)の実験結果	35
3.4.2 Case2(くすぶり期有り)の実験結果	48
3.5 センサ反応時刻まとめ	57
3.6 考察	63
4. 実大トンネル B における PDS の煙色による検出特性実験	64
4.1 実験の概要	64
4.2 実験装置の概要	65
4.3 実験ケースの設定	68
4.4 実験結果	69
4.4.1 PDS の煙検知状況	69
4.4.2 煙色による PDS 受光量への影響	74

4.4.3 煙の拡がり検知.....	75
4.4.4 検知時刻まとめ.....	77
4.5 考察 .....	78
5. 結論 .....	79
参考文献 .....	81
謝辞 .....	84

## 用語の説明

本論文内で扱う火災では、様々な形態や燃焼物、周辺環境等の条件があり、使用する火災や煙に関する用語の定義を下記に記す。

- ・くすぶり：

火災の初期段階で、外部に炎が発出しておらず、煙や有害ガスが発出されている状況をいう。微小な熱も発出されるが発熱速度は微小である。

- ・煙：

可燃性ガスから遊離した炭素粒子やその塊である煤、また未燃焼物質の燃焼途上における凝縮液滴粒子などが、空気中に浮遊拡散している状態で粒子の大きさは0.01～10 $\mu\text{m}$ 程度である。

- ・Cs濃度：

煙粒子による受光量の減衰を Lambert-Beer の法則から減衰係数として定義する。

## 1. 序論

### 1.1 火災の発生状況と検知方法

#### 1.1.1 火災の発生状況

火災は燃焼した物質が焼失するだけでなく、人々の社会生活にも大きな影響を及ぼす場合がある。平成30年（2018年）に国内で発生した火災の件数は約38,000件にも及び、1日あたり104件発生したことになる。表1-1に各年の火災区分ごとの発生比率を示す。平成30年は建物火災が全体の54.7%と高い比率占め、次に車両火災、林野火災、船舶火災、航空機火災と続いている（その他の火災は除く）。平成20年、平成29年と比較してもこの順位は変わらない状況である。

車両火災は、自動車車両、鉄道車両及び被けん引車又は積載物が焼損した火災を示しており、この中でもトンネル内での火災に着目すると、図1-1に示すとおり10年間の道路トンネル内では275件発生しており、平均27.5件/年となり、平成30年では25件が発生した。

昭和54年（1979年）7月に発生した東名高速道路日本坂トンネル火災事故を契機に「道路トンネル非常用施設設置基準」などが制定され、その後も火災事故防止対策の拡充に努めている。近年の道路トンネル車両火災では、平成28年（2016年）3月に山陽自動車道八本松トンネルで発生した事故が記憶に新しいところである。

また、海外に目を向けると1999年3月にフランスとイタリアを結ぶモンブラントンネル火災事故、1999年5月にオーストリアのタウエルントンネル火災事故、2001年10月にスイスのゴットハルトトンネル火災事故と10名以上の死者が発生した事故が発生している。

表 1-1 火災区分ごとの発生比率<sup>2)</sup>

火災区分	平成20年	平成29年	平成30年
建物火災	57.4%	54.3%	54.7%
林野火災	3.6%	3.3%	3.6%
車両火災	10.2%	9.8%	9.6%
船舶火災	0.2%	0.2%	0.2%
航空機火災	0.0%	0.0%	0.0%
その他の火災	28.6%	32.5%	31.9%
合計	100.0%	100.0%	100.0%

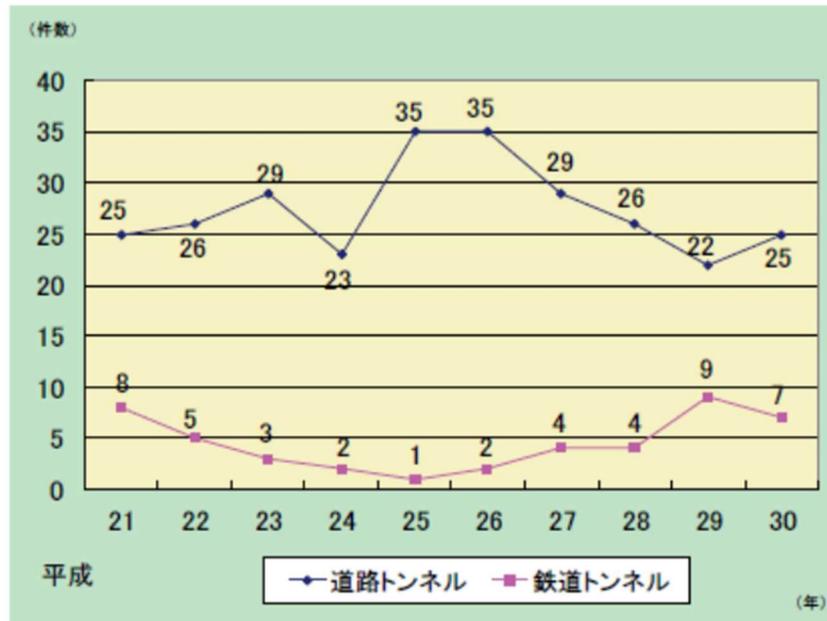


図 1-1 国内のトンネル内車両・施設火災件数の推移<sup>2)</sup>

### 1.1.2 火災の検知方法

火災が発生した場合、速やかに火災の発生を検知・通報して消火活動や避難行動につなげることが重要である。早期の火災検知や確実な火災検知のための研究や開発が様々な分野で行われており、建物火災や鉱山の坑内火災などを対象に火災で発生した有害ガスを検知する手法の研究<sup>3),4),5)</sup>、化学プラントや発電所・トンネルなどを対象に画像処理を用いて検知する手法の研究<sup>6),7),8),9)</sup>、工場や変電所などを対象に臭いセンサを用いて検知する手法の研究<sup>10),11)</sup>、炭鉱のベルトコンベア坑道などを対象に光ファイバによる温度センサを用いて検知する手法の研究<sup>12)</sup>などがあげられる。

## 1.2 道路トンネルでの火災対応

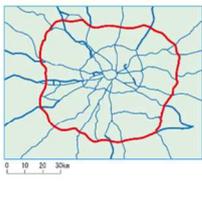
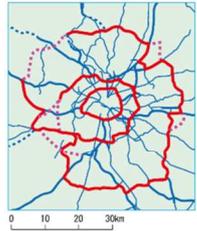
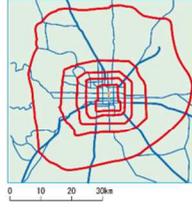
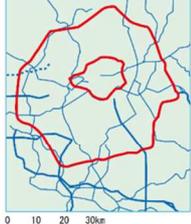
### 1.2.1 都市部の高速道路の状況

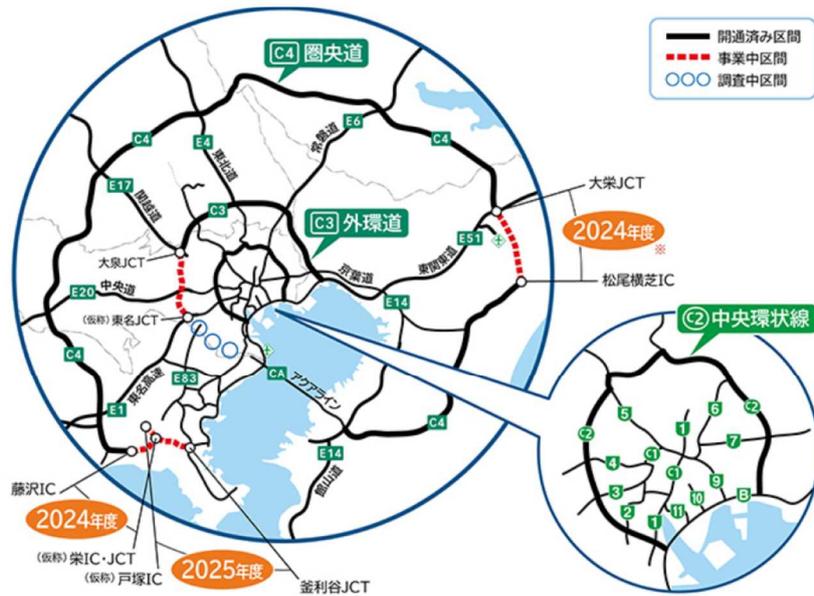
世界の主要都市では、都心を中心とした環状道路が整備されている。表 1-2 に示すように 2018 年時点で世界の 5 都市では環状道路の整備<sup>13)</sup>が進んでおり、イギリスのロンドン、中国の北京、韓国のソウルでは既に 100%整備が完了している。また、ドイツのベルリンでは 97%、フランスのパリでも 85%の計画されている環状道路の整備が完了している状況である。

日本でも図 1-2 に示すように首都圏で 3 つの環状道路<sup>14)</sup>が計画されており、順次建設が進められている。2020 年時点で計画の約 85%が供用した状況である。大都市では人口が密集しており、密集した建築物、縦横無尽に走る鉄道や地下鉄、水道・ガス・電力・通信などの生活インフラが張り巡らさせている状況である。そのような状況の中、環状道路の整備にあたり地上から 40m 以深の大深度地下を利用した建設が進められている。東京外かく環状道路の関越自動車道の大泉ジャンクションから東名高速道路の東名ジャンクションまでの延長約 16km が大深度長大シールドトンネルで計画されている。

都市部の高速道路では、平日は大型車の交通量が多く、休日は小型車の交通量が多くなり、特に大型連休となると局所的に交通量が増大する。このような状況の中、接続道路の状況や交通集中によりトンネル内で渋滞の発生が予測され、渋滞が発生している中で火災が発生した場合、大きな被害が予測される。そのため、配備する非常用設備や安全な避難のための設備が検討されている。

表 1-2 世界主要都市の環状道路整備状況（2018 年時点）<sup>13)</sup>

ロンドン	パリ	ベルリン	北京	ソウル
				
供用延長 188km	供用延長 267km	供用延長 217km	供用延長 433km	供用延長 168km
計画延長 188km	計画延長 313km	計画延長 223km	計画延長 433km	計画延長 168km
整備率 100%	整備率 85%	整備率 97%	整備率 100%	整備率 100%



	供用延長	計画延長	整備率
C2 中央環状線	約47km	約47km	100%
C3 東京外かく環状道路	約50km	約85km	60%
C4 首都圏中央連絡自動車道	約270km	約300km	90%

図 1-2 首都圏3環状道路の整備状況（2020 年時点）<sup>14)</sup>

## 1.2.2 道路トンネルの特徴

道路トンネルは閉鎖された特殊な空間のため、トンネル内での火災発生時には、交通状況やトンネル内に取り残された要避難者の状況に合わせた適切な煙の排出やコントロールを行い安全な避難環境を確保する必要がある。これを実現するための1つの方法として、供用中のいくつかの長大トンネルでは、換気設備の停止や車道内風速を低減する換気機運転を行い、風速を一定に維持する制御が行われている。これらを行うことで、煙の拡散抑制や成層状態を保ち要避難者が安全な空間に避難を完了するまで煙が侵入しないような対応が行われている。

また、日本では地方都市と首都東京をつなぐ放射状の都市間高速道路を都心入口部で接続する都市内高速道路として「東京外かく環状道路」の建設が進んでいる。この道路は都心部に建設されるため、図1-3に示すような延長約16kmもの大深度長大トンネルが計画されている<sup>15)</sup>。また、放射状に伸びる都市間高速道路との結節点となるジャンクションは地下構造となり、地下のトンネル部分に分合流部が配置される構造である。東京外かく環状道路の大深度トンネルには3箇所のジャンクションと1箇所のインターチェンジがあり、特に図1-4に示す中央ジャンクション<sup>16)</sup>に関しては、中央高速道路と一般道に接続するため、より複雑な構造となっており、車線数に変化、急勾配箇所、急カーブ箇所、更には分合流箇所や料金所などが配置される。表1-3に中央ジャンクションに計画されているランプトンネルの一部の諸元を示す<sup>16)</sup>。このような複雑な構造のトンネル内で火災が発生した場合、火災箇所の幾何構造、交通状況、並びに換気運転状態により、火災から発生する煙（熱、ガスを含む）の挙動は火源の規模と共に時々刻々と変化してしまう。このため被災者は素早く避難する必要があり、適切な避難施設や煙のコントロールによる避難環境の維持が必要となる。

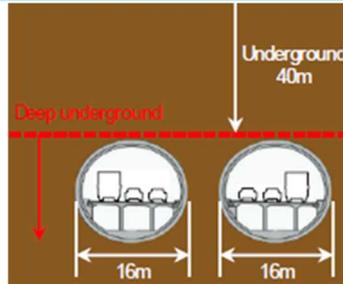


図 1-3 東京外かく環状道路の大深度長大<sup>15)</sup>

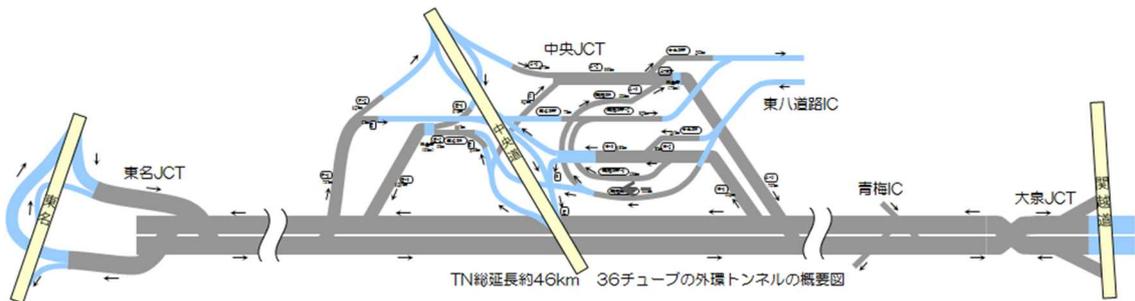


図 1-4 中央ジャンクションのランプ概要図<sup>16)</sup>

表 1-3 中央ジャンクションランプトンネルの概要<sup>16)</sup>

ランプ名	B-3	A-2	A-5	K-E_ON	H-1	H-3
長さ	1,210m	265m	782m	488m	501m	210m
最大こう配	-6%	-1.4%	-6%	+8%	+6%	+6%
最小半径	800m	500m	800m	88m	800m	1,000m
トンネル幅	9m	9m	9m	6m	9m	6m
車線数	2	2	2	1	2	1
断面積	59.7m <sup>2</sup> 63.3m <sup>2</sup>	←	←	43.7m <sup>2</sup>	59.7m <sup>2</sup> 64.0m <sup>2</sup>	43.7m <sup>2</sup>

### 1.2.3 道路トンネルでの火災対応設備の設置

わが国のトンネルでは内部で事故や火災など交通に危険を及ぼすおそれがある場合、安全かつ円滑な交通を確保するためにトンネル非常用施設が設けられている。特に火災事故に対するトンネル非常用施設は、昭和42年（1967年）3月に発生した国道1号線鈴鹿トンネルの火災事故や昭和54年（1979年）7月に発生した東名高速道路日本坂トンネル火災事故を受けて拡充され、「道路トンネル非常用施設設置基準」が制定された<sup>17)</sup>。その後も社会情勢の変化等に応じて改定がなされている。

道路トンネル非常用施設設置基準では、非常用施設を設置するために、図1-5に示すようにトンネル延長と交通量等から5段階に等級を区分している。また、事故の際の連絡や危険防止、拡大防止のために、表1-4に示すようにトンネル等級区分に応じて設置する非常用施設の標準が示されている。

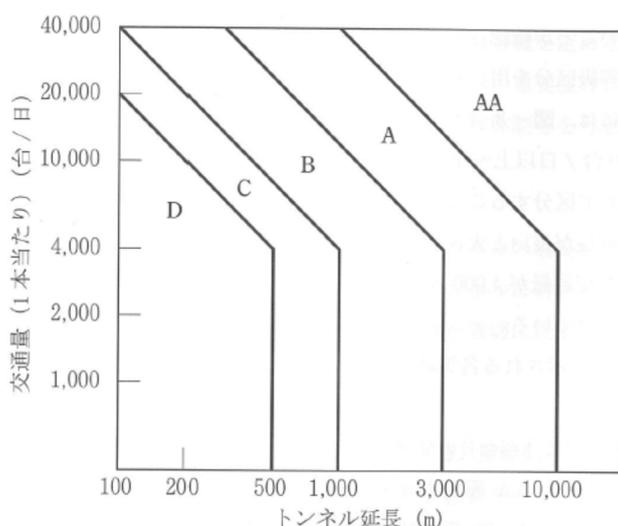


図1-5 トンネルの等級区分<sup>18)</sup>

表 1-4 トンネル等級別の非常用施設<sup>19)</sup>

非常用施設		等級	AA	A	B	C	D
通報設備	通話型通報設備	○	○	○	○		
	操作型通報設備	○	○	○	○		
	自動通報設備	○	△				
警報設備	非常警報設備	○	○	○	○		
消火設備	消火器	○	○	○			
	消火栓設備	○	○				
避難誘導設備	誘導表示設備	○	○	○			
	避難情報提供設備	○	△				
	避難通路	○	△				
	排煙設備	○	△				
その他の設備	給水栓設備	○	△				
	無線通信補助設備	○	△				
	水噴霧設備	○	△				
	監視設備	○	△				

(注) 上表中○印は「設置する」、△印は「必要に応じて設置する」ことを示す。

### 1.3 本研究の目的と概要

#### 1.3.1 本研究の目的

首都圏中央連絡自動車道など近年建設が進められている都市型高速道路のトンネルは、大深度に建設され延長が長く縦断勾配が大きくなるケースがある。さらに交通量も多く、慢性的な渋滞などにより火災地点の下流側に車両が存在する可能性がある。そのため、火災が発生すると避難を必要とする人員も多くなり、安全な空間への避難を完了するための時間は山岳トンネル等に比べ多く必要となる。このため、このようなトンネルでは、火災をより早期に検知してより早く避難開始を促し、安全な避難環境を確保するための換気風速制御を行うことが重要となる。

既往の研究によると、高速道路のトンネル内で発生する車両火災は車両故障による火災が約7割、車両事故による火災が約3割となっている<sup>20)</sup>。車両故障による火災の発生箇所をエンジンや車室内と考えた場合、図1-6に示す一般的な車両火災時の発熱速度変化イメージから火災初期のくすぶり期では煙やCO、CO<sub>2</sub>等の有害ガスが発生する。エンジン部などが高温となっており、熱気流も発出されるが発熱速度はごく少ない。その後、火源の延焼に伴う成長期に達すると、前記のほかに炎・放射熱が発せられる。国内の道路トンネルで標準的に設置されている火災検知器はこの炎を検知する。このため、より早期に車両火災を検知するためには、くすぶり期で検知することが有効である。

道路トンネルで火災を検知する手法は、熱・炎・煙・燃焼ガス(CO・CO<sub>2</sub>)検知・画像処理等が挙げられる<sup>21)</sup>が、国内の道路トンネルでは炎検知型の火災検知器が標準的に採用されており<sup>22)</sup>、長期にわたり新たな手法は採用されていなかった。しかし、2019年に「道路トンネル非常用施設設置基準」が改定され<sup>19)</sup>、炎検知型の火災検知器以外にも採用可能となり、新技術に対する選択肢が増加した。このため、図1-6で示したように炎発出前の煙やガスなどを検知することにより、より早期の火災検知が可能となるものと考えた。

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。

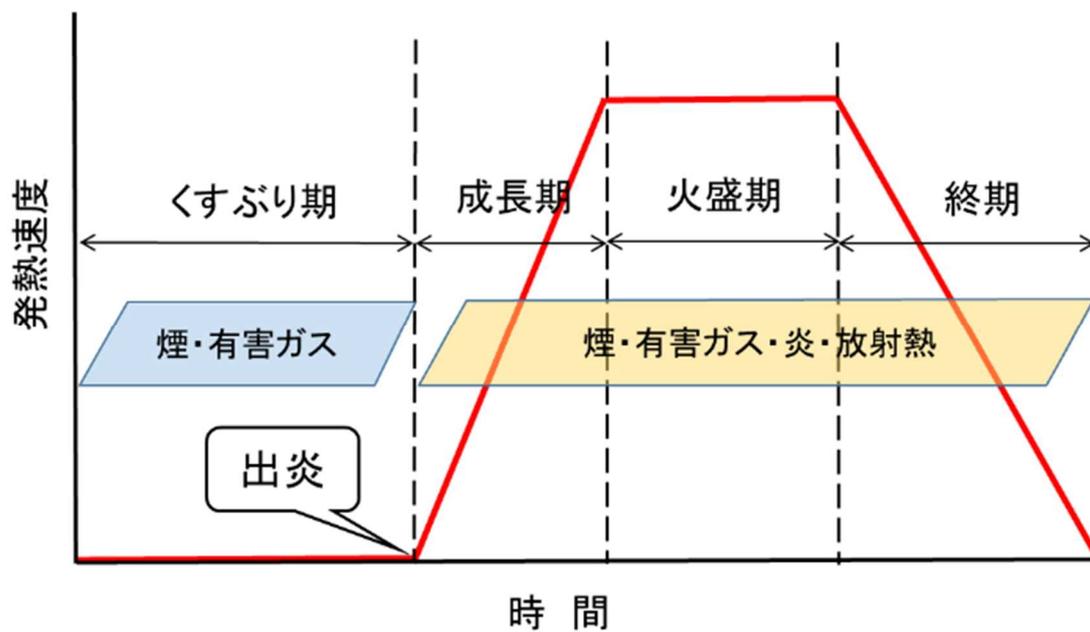


図 1-6 一般的な車両火災の発熱速度変化イメージ図<sup>23),24)</sup>

### 1.3.2 検討手順フロー

本研究の目的を達成するために、検討の手順を以下のように設定した。

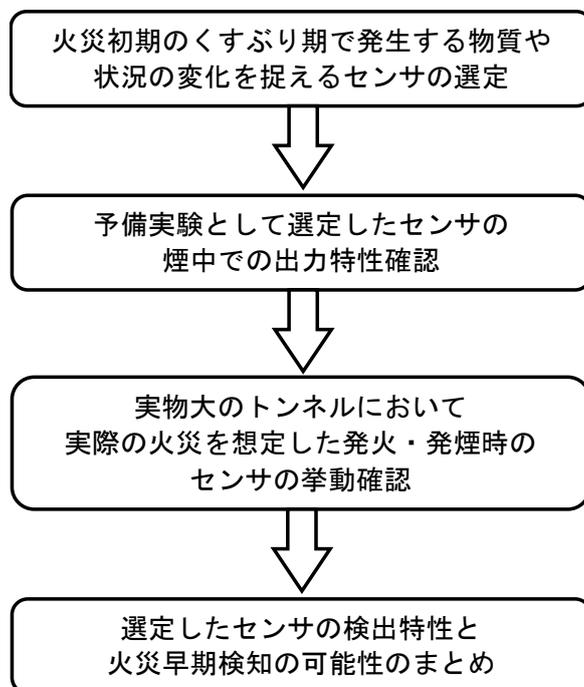


図 1-7 研究の検討手順

### 1.3.3 本研究の概要

本論文は5章で構成する。

第1章序論では、近年の国内の火災発生状況と火災の検知手法についての検討状況を紹介する。また、世界の主要都市における環状道路の整備状況や日本の首都圏環状道路の整備状況について紹介する。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、道路状況や交通状況によりトンネル内での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。山岳トンネルに比べると要避難者が増加すると想定されるため、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。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を検討できることを紹介し、本研究の目的と概要を説明する。

第2章センサの選定と煙中での出力特性では、火災の早期検知を目的とした火災初期段階で発生する物質や周辺状況の変化を捉えるセンサを選定する。また、選定した3つのセンサの煙中での出力特性について、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する。各センサの出力値とCs濃度との相関を確認する。

第3章実大トンネルAにおける火災実験では、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する。また、各センサの反応開始時刻を比較して、火災の早期検知の可能性について確認する。なお、火災の条件として、炎が発出する火災と炎が発出する前のくすぶり期の状態を想定した。

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では、第3章の実験においてフォトダイオードセンサ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する。トンネル縦断方向にCs濃度計、フォトダイオードセンサおよび熱電対を配置して、暫定的な火災検知の閾値を設定し、検知状況について確認する。

第5章は本論文の結論で、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る。

## 2. センサの選定と煙中での出力特性

### 2.1 緒言

第1章で述べたように、より早期に車両火災を検知するためには、炎発出前のくすぶり期で検知することが有効である。くすぶり期の火災を検知するためには、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<sup>25)</sup>、それぞれの検知方法を実現可能であると想定するセンサを選定した。また、火災で発生した煙の検出や有害ガスの濃度の検出について、選定したセンサの計測特性を確認するため、予備実験として模型トンネルを使用した定性的な特性確認実験を行った。

## 2.2 センサの選定

選定した1つ目のセンサの煙センサ（Smoke Sensor, 以降 SS という）は煙粒子を検知するセンサで、スイスの道路トンネル技術基準では標準仕様<sup>26)</sup>として換気設備を有するトンネルに設置されている。SS はセンサ周辺の気流を利用して煙をセンサ内に取り込み、LED 光を照射して散乱光量を計測する仕組みで煙濃度を出力する。SS は可動部が無く消耗部品が必要ない、メンテナンスについても5年に1度程度の定期クリーニングとチェック装置による自動校正のみで維持管理も非常に容易である。図2-1にSSの外観と計測の原理を示す。また、表2-1にSSの仕様を示す。

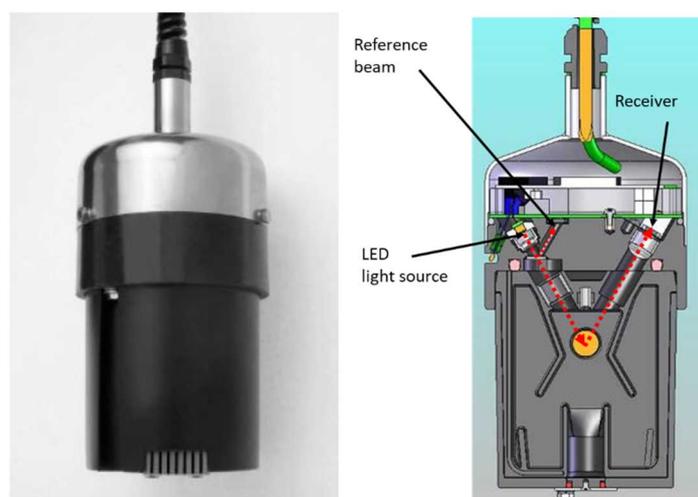


図 2-1 SS の外観と計測の原理<sup>27)</sup>

表 2-1 SS の仕様表<sup>27)</sup>

測定原理	120°散乱光測定
測定波長	670nm
ノミナル・レンジ	0~3 E/m
分解能	0.001 E/m
反応時間	5 秒（風速 1.5m/s 時）
フローセル材質	PC/ABS
ハウジング材質	ステンレス 316Ti
周囲温度	-30°C~55°C
周囲湿度	0~100%
保護等級	IP66
電圧	24 VDC
入力電力	4 W
重量	0.9 kg
寸法	約 Φ107×283mm

選定した2つ目のセンサのレーザガスセンサ（Laser Gas Sensor, 以降LGSという）は、火山性ガス等の濃度を計測する装置で、有害ガス濃度と同時に煙濃度計測ができる可能性がある<sup>28)</sup>ことから選定した。LGSは可視・赤外領域の光信号を変化させながら大気中を伝搬させ、ガス分子の持つ吸収スペクトルに応じた光強度の変化を測定することで特定のガス分子の濃度を算出する。図2-2にLGSの外観と計測の原理を示す。

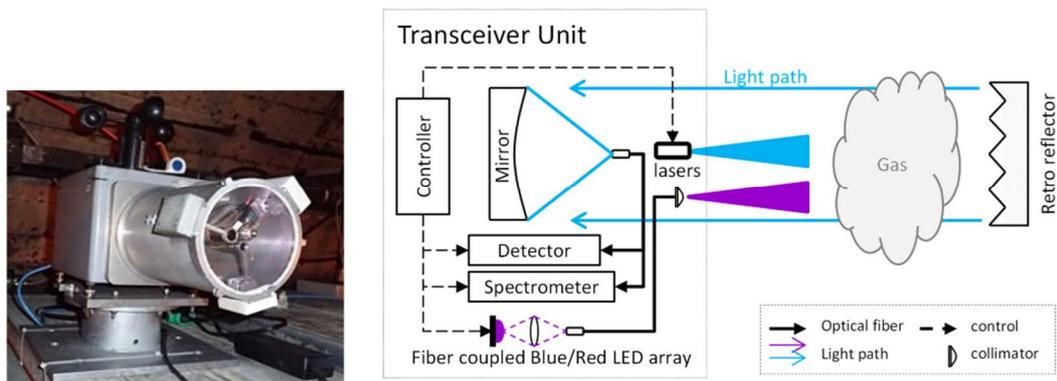


図 2-2 LGS の外観と計測の原理<sup>29)</sup>

選定した3つ目のセンサのフォトダイオードセンサ（Photo Diode Sensor, 以降 PDS という）は、市販のフォトダイオードチップとアンプを使用して自作したセンサで、専用の光源を必要とせず、設置点から周辺を俯瞰的に測定し、受光量変化から煙の存在を検知できる可能性がある。図 2-3 に製作した PDS の外観と概要図、表 2-2 にフォトダイオードチップの仕様を示す。今回採用したフォトダイオードチップはPN型で暗電流が小さい特徴があり光量測定に使用される。図 2-4 に示すように空乏層と呼ばれる半導体の結合部付近に内部電界が発生するため、外部から電圧を加えなくても光が当たると電流が流れる。光の強さにより流れる電流値も変化するため、電流を計測することにより光の強度が捉えられる。また、PDS の指向特性を確認するため、暗室内で 450lm・3,300lx の LED 光源を用いて図 2-5 に示す試験を行った。PDS 正面から 60°でも 30%程度の光量を捉えることができることを確認した。

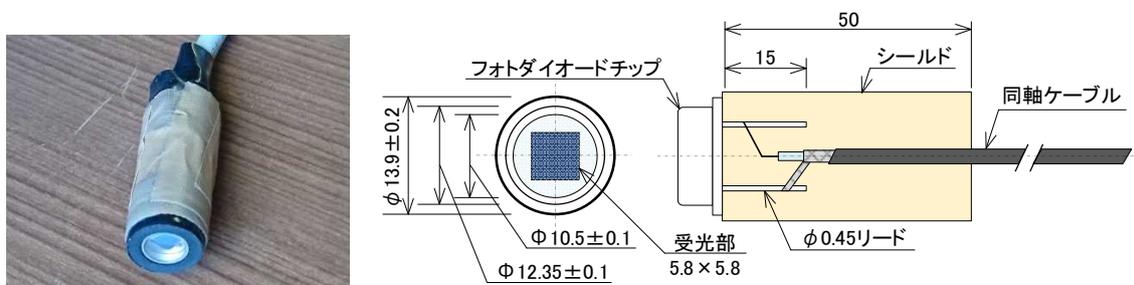


図 2-3 製作した PDS の外観と概要図

表 2-2 フォトダイオードチップの仕様表<sup>30)</sup>

型式	S2386-8K
受光面サイズ	5.8×5.8mm
素子数	1
冷却	非冷却
逆電圧 max.	30 V
感度波長範囲	320～1100 nm
最大感度波長	960 nm
受光感度	0.6 A/W
暗電流	50 pA
上昇時間	10 μs
端子間容量	4300 pF
雑音等価電力	$2.1 \times 10^{-15}$ W/Hz <sup>1/2</sup>

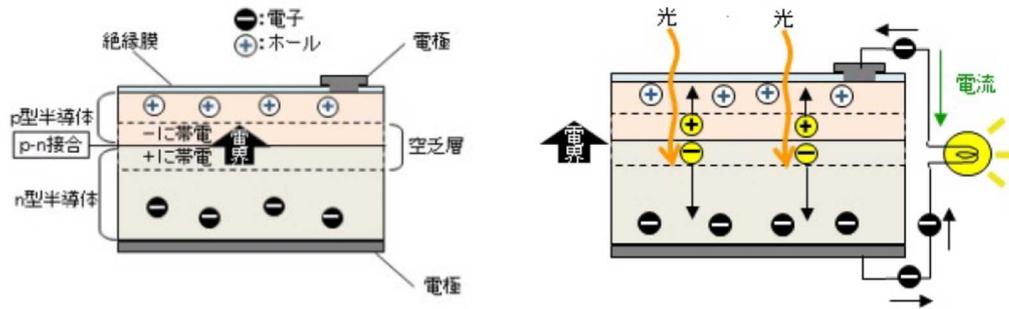


図 2-4 フォトダイオードチップの構造と原理<sup>30)</sup>

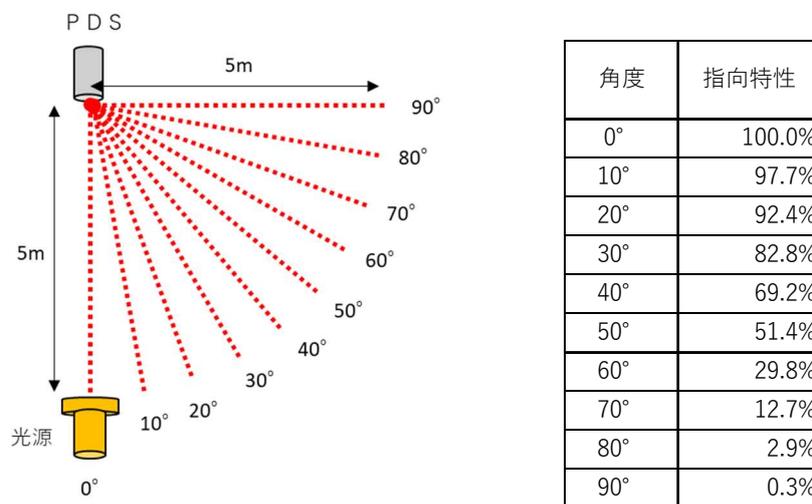


図 2-5 PDS の指向性確認結果

選定した3つのセンサのほかに、発生した煙の濃度を計測するCs濃度計、第3章の実大トンネルAでの実験で使用する炎検出型火災検知器、ならびに第4章の実大トンネルBでの実験で使用するK型熱電対を準備した。Cs濃度計はレーザー光を用いて投後部と受光部間に存在する煙により減衰した透過光量を計測して電圧を出力する。出力された電圧からLambert-Beerの法則を用いてCs濃度を算出する。図2-6に基準の煙濃度を計測するCs濃度計の外観図と仕様、図2-7に炎検出型の火災検知器外観、図2-8にK型熱電対の外観を示す。また、表2-3に選定したセンサ3点、煙の到達や煙濃度の基準とするCs濃度計、標準的にトンネルに設置されている火災検知器、K型熱電対の概要をまとめた。



種類	エリア透過型
	高性能
型式	LV-NH100
検出範囲	10mm
FDA class	クラス1
JIS (IEC)	クラス1
光源	可視光半導体レーザー 波長：660nm
検出距離	2000mm
使用周囲温度	-10～+55℃（氷結しないこと）
使用周囲湿度	35～85%RH（結露しないこと）

図2-6 Cs濃度計の外観図と仕様<sup>31)</sup>



図2-7 炎検出型の火災検知器の外観

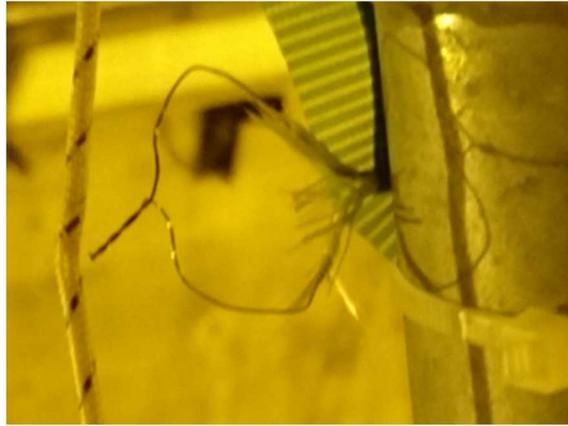


図 2-8 K 型熱電対の外観

表 2-3 選定したセンサ概要

センサ	検出対象	検出方法	仕様等
煙センサ (SS)	煙粒子	波長 670nm のレーザ光を光源として、単位長さ当たりの散乱光量から煙濃度を測定 センサ設置位置の煙濃度を計測	SIGRIST 社製 FIRE GUARD トンネル内風速 1.5m/s 時に 5 秒で計測可能 センサ内に煙が流入するために周辺風速 1.5m/s 以上が必要 計測範囲 0~3E/m, 分解能 0.001E/m
レーザガスセンサ (LGS)	CO, CO <sub>2</sub> 等のガス濃度	可視・赤外線領域のレーザ光を用いて、検出対象ガスの光吸収スペクトルに応じた光強度変化からガス濃度を測定 投光部・受光部間の平均ガス濃度を計測	NEC 社製ガス濃度センサ 複数のガスを同時に計測 CO <sub>2</sub> の計測精度は 50~10,000ppm で誤差 10%以内
フォトダイオードセンサ (PDS)	周囲からの光量	設置地点から俯瞰的に周囲からの受光量を測定 出力は電圧値	浜松ホトニクス社製フォトダイオードチップ S2386-8K とフォトセンサアンプ C9329 を使用し自作したセンサ
Cs 濃度計	煙粒子	投光部から発出した波長 660nm のレーザ光の透過光量を受光部で測定 投光部と受光部間の距離は 0.8m に設定 実験時に煙到達の基準となる Cs 濃度計測に使用	KEYENCE 社製デジタルレーザセンサ LV-NH100 とアンプ LV-N11MN1 を使用し自作した計測器 煙のないクリアな状態から避難が困難とされる Cs 濃度までの 0~0.4 程度に着目
火災検知器	炎	二波長式ちらつき型検知器 火源が発出する短波長域と長波長域 2 つ (0.8~1.8 $\mu$ m) の赤外線エネルギー強度と燃焼変動周波数から検知	能美防災社製 RDCJ007-D 正面より各々 90 度、幅 25m と正面前方 25m の範囲において 0.5m <sup>2</sup> 火皿に入れたガソリン 2 リットルを燃焼させ、30 秒以内に検知
K 型熱電対	温度	+脚、-脚の片端を接続し、片端を開放して電位差 (熱起動力) を検出する	JIS C1602:2015 K 型熱電対 +脚 クロメル、-脚 アルメル 温度範囲 -270°C~1372°C 素線径 3.20mm 許容差 -40°C以上 375°C未満で $\pm$ 1.5°C

## 2.3 センサの予備実験

### 2.3.1 実験の概要

火災で発生した煙・有害ガスの濃度について、選定したセンサの計測特性を確認するため、予備実験として模型トンネルを使用した定性的な特性確認実験を行った。煙・ガス濃度を変化させるため、燃料としてエタノール、n-ヘプタン、灯油を使用した。実験は  $0.6 \times 0.6 \times 10\text{m}$  の矩形の模型トンネル内で各燃料を燃焼させて、十分に充満させ均一化した煙・有害ガスを各センサで計測した。同時に Cs 濃度計にて模型トンネル内の Cs 濃度を計測し、Cs 濃度に対する各センサの計測値を比較して、相関を確認した。

### 2.3.2 実験装置の概要

模型トンネル実験は、金沢大学所有のケイ酸カルシウム製の矩形模型トンネルを使用した。模型トンネルは縦 0.6m×横 0.6m×長さ 10m で両端の坑口は開閉が可能な閉鎖板を設置した。また、各実験ケースが終わり次のケースに移る前に模型トンネル内の煙を完全に排出するため、両端の閉鎖板を開放して排気ファンを接続し、排気を行った。

模型トンネル内に燃料を燃焼する直径 100mm の火皿を置き、ケースごとに 3 種類の燃料種別と量を変え燃焼させた。燃焼により発生した煙を模型トンネル内に均一に拡散させるため、模型トンネル内に攪拌用ファンをセットした。模型トンネル内の Cs 濃度を計測するため、Cs 濃度計をトンネル断面方向に投光部、受光部を対面させ、トンネル高さ方向に 4 か所設置した。トンネル内の Cs 濃度は 4 か所の Cs 濃度計の計測値の平均値とした。

SS は固定用の架台に設置し、トンネル中間高さ付近を計測できるようにセットした。LGS は模型トンネルの外側に投受光部ならびに反射板を固定した。トンネル両端の閉鎖板には LGS の光軸が通過する部分にガラス板をはめ込んだ。PDS は LED 光源 (570 ルーメン) と対面するように架台に固定してトンネル内にセットした。図 2-9 に模型トンネルと各センサの設置状況を示す。また、図 2-10 に模型トンネルの外観を示す。

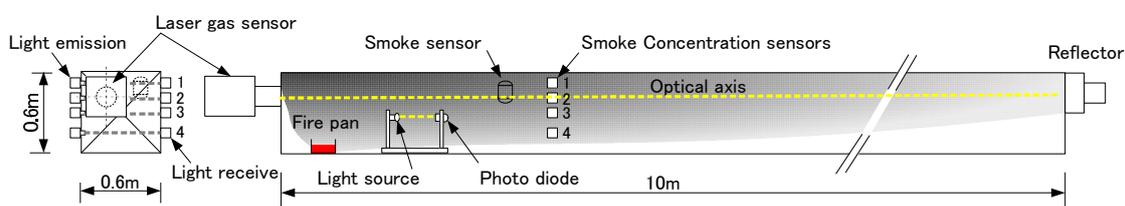


図 2-9 模型トンネルの概要図と各センサの設置状況



図 2-10 模型トンネルの外観

SS と LGS は直接データロガーに接続しデータを記録した。また Cs 濃度計と PDS はアンプを介してデータロガーに接続しデータを記録した。図 2-11 に Cs 濃度計の接続図を図 2-12 に PDS の接続図を示す。また、図 2-13 にデータロガー（オムロン ZR-RX45A）の外観図を表 2-4 にデータロガーの仕様表を示す。



図 2-11 Cs 濃度計の接続図

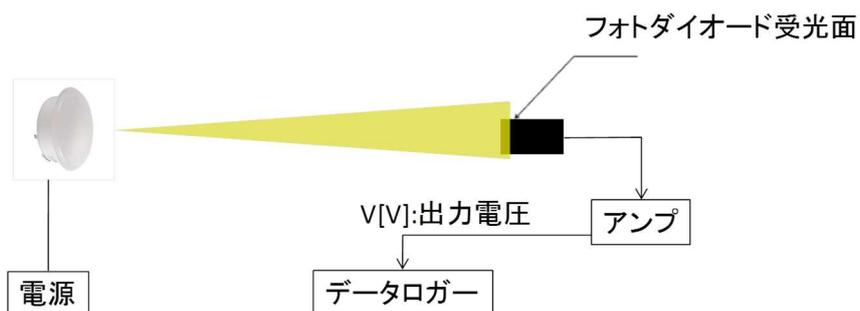


図 2-12 PDS の接続図



図 2-13 データロガー（オムロン ZR-RX45A）の外観図<sup>32)</sup>

表 2-4 データロガー（オムロン ZR-RX45A）の仕様表<sup>32)</sup>

項目		ZR-RX45A	
入力方式		全チャンネル絶縁入力	
入力端子形状		M3 ネジ式端子	
アナログ入力チャンネル数		20CH（最大拡張時 200CH）	
サンプリング周期		10ms（1CH 使用時）～1h	
A/D 分解能		16bit	
A/D 変換方式		デルタΣ方式	
測定レンジ	電圧	20・50・100・200・500mV, 1・2・5・10・20・50V, 1-5V F.S.	
	温度	熱電対	K・J・E・T・R・S・B・N・W（WRc5-26）
		測温抵抗体	Pt100・JP t 100・Pt1000（IEC751）
	湿度	0～100%（電圧 0～1V スケーリング換算）	
外部入出力	デジタル入力	ロジック入力 4CH かパルス入力 4CH の選択方式	
	アラーム出力	4CH（オープンコレクタ出力）	
PCI/F	種類	LAN（100BASE-TX）, USB2.0（HIGH SPEED）	
	機能	イーサネット	Web サーバ機能, FTP サーバ機能, FTP クライアント機能, NTP クライアント機能 パソコンへのリアルタイムデータ転送, パソコンからの本体制御
		USB	パソコンへのリアルタイムデータ転送
記憶装置	本体内蔵	フラッシュメモリ：約 4GB	
	外付け	USB メモリ	
表示		5.7 インチカラー液晶（VGA：640×480 ドット）	
使用環境		0～45℃, 5～85%R.H.（バッテリー駆動時：0～40℃, バッテリー充電時：15～35℃）	
電源電圧		AC アダプタ：AC100～240V/50～60Hz, DC 駆動：8.5V～24V, バッテリ：DC7.4V（2 個搭載）	
消費電力		32VA（AC アダプタ使用時）	
質量		約 900g	
外形寸法		232×152×50mm	

### 2.3.3 実験ケースの設定

実験のケースは、燃焼する燃料の種別ごとにかつ燃焼量ごとのケースを設定した。実験では各ケース3回の実験を行いデータ収集した。表2-5に実験ケースをまとめた。

表 2-5 煙中のセンサ出力特性実験ケース

ケース NO.	燃料種別	燃焼量 (ml)	使用センサ
1	エタノール	5	SS
2		10	
3		20	
4		30	
5	n-ヘプタン	5	LGS
6		10	
7		20	
8		30	
9	灯油	5	PDS
10		10	
11		15	

(SS はセンサ内に煙が取込まれず計測できなかったため検証から除外した)

#### 2.3.4 実験結果とセンサの出力特性

図 2-14 は n-ヘプタンを燃焼させたケース 5～ケース 8 における, Cs 濃度計で測定した Cs 濃度と PDS で計測した電圧比 ( $V/V_0$ ) との相関を示している. ここで電圧比とは点火・発煙開始前 30 秒間の平均電圧を初期電圧  $V_0$  とし, 初期電圧と計測中の出力電圧  $V$  の比率を示し, Cs 濃度がゼロの時, 電圧比は理論的に 1.0 となり, 受光量の減少, 即ち煙に光がさえぎられることで電圧比は減少する. 計測の結果, 電圧比は Cs 濃度と概ね反比例の関係にあることが分かる. 電圧比は Cs 濃度がゼロのとき概ね 1.0 となり, 実験値から得た近似式と定性的に相関があることが確認できた.

図 2-15 は灯油を燃焼させたケース 9～ケース 10 における, Cs 濃度と PDS で計測した電圧比 ( $V/V_0$ ) との相関を示している. このケースでも電圧比は Cs 濃度と概ね反比例の関係にあり, 実験値から得た近似式と定性的に相関があることが確認できた. また, どちらのケースでも Cs 濃度と PDS の電圧比は概ね一致している. 今回の実験では燃焼により発生する煙の濃淡が異なる燃料を使用した, PDS は光源からの受光量の変化を捉えることから, 煙の発生源に関わらず PDS の電圧比から Cs 濃度が想定できる可能性を確認した.

エタノールについては, 燃焼時の発煙量が少なく各センサの反応が鈍くデータの信頼性が低いため割愛する.

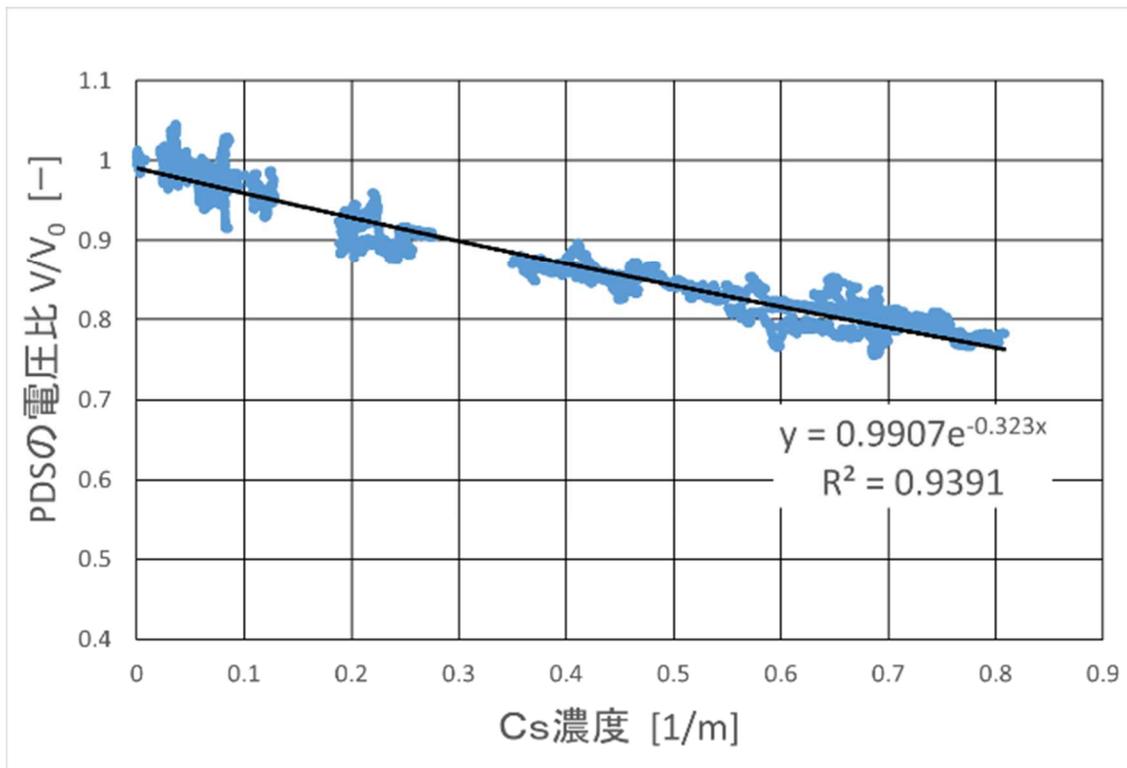


図 2-14 Cs 濃度と PDS 出力電圧比との相関 (n-ヘプタン燃焼時)

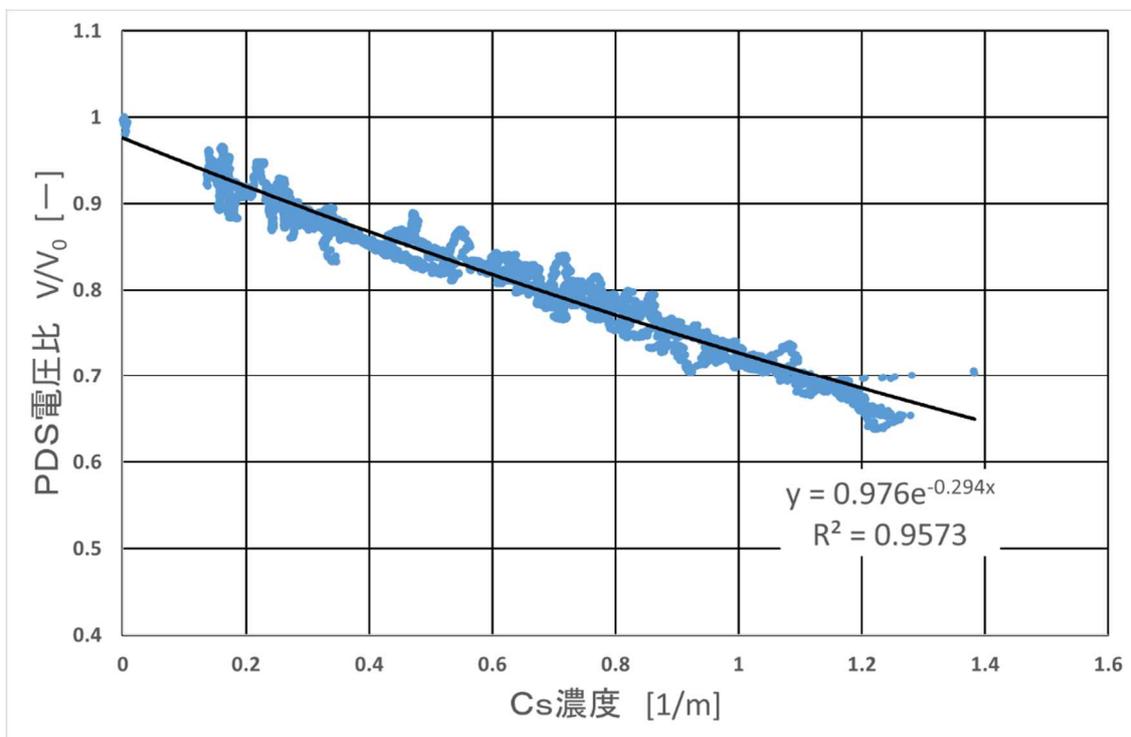


図 2-15 Cs 濃度と PDS 出力電圧比との相関 (灯油燃焼時)

図 2-16 は n-ヘプタンを燃焼させたケース 5~ケース 7 における, Cs 濃度と LGS で計測した CO<sub>2</sub> 濃度との相関を示している. LGS で計測したレーザ光の光強度変化から CO<sub>2</sub> 濃度は Cs 濃度と概ね比例の関係にあり, 実験値から得た近似式と定性的な相関があることが確認できた.

図 2-17 は灯油を燃焼させたケース 9~ケース 10 における, Cs 濃度と LGS で計測した CO<sub>2</sub> 濃度との相関を示している. CO<sub>2</sub> 濃度は Cs 濃度と概ね比例の関係にあり, 実験値から得た近似式と定性的な相関があることが確認できた. 図 2-16 と図 2-17 を比較すると, 燃焼源が異なる場合発生した煙による Cs 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度は一致していない. これは燃焼する物質により CO<sub>2</sub> 発生量が異なるためであるが, 燃焼の生成物である煙と CO<sub>2</sub> は燃焼規模が大きくなれば生成物の発生量も多くなるものと考えられる. また, 不完全燃焼の度合いにより生成物の発生量は異なることが考えられる. しかし, 今回の実験では十分に完全燃焼させたため, CO<sub>2</sub> 発生量と Cs 濃度が概ね比例関係であることが把握できた.

エタノールについては, 燃焼時の発煙量が少なく各センサの反応が鈍くデータの信頼性が低いため割愛する.

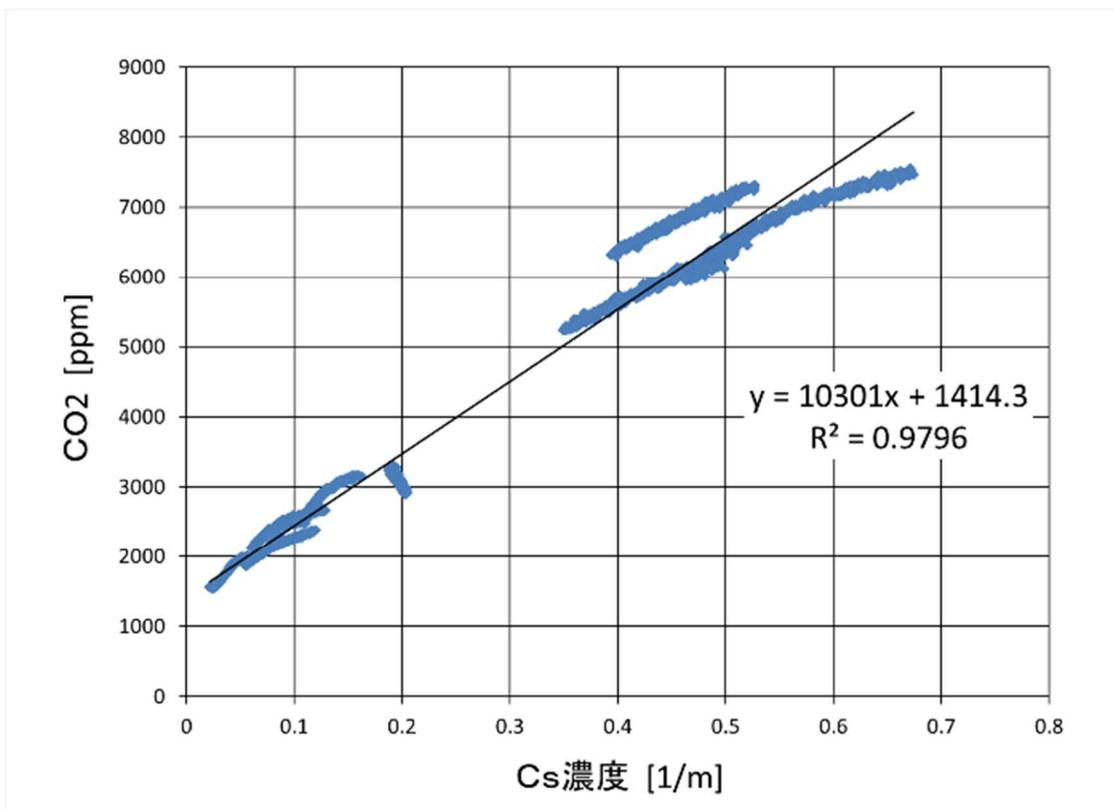


図 2-16 Cs 濃度と LGS による CO<sub>2</sub> 計測値との相関 (n-ヘプタン燃焼時)

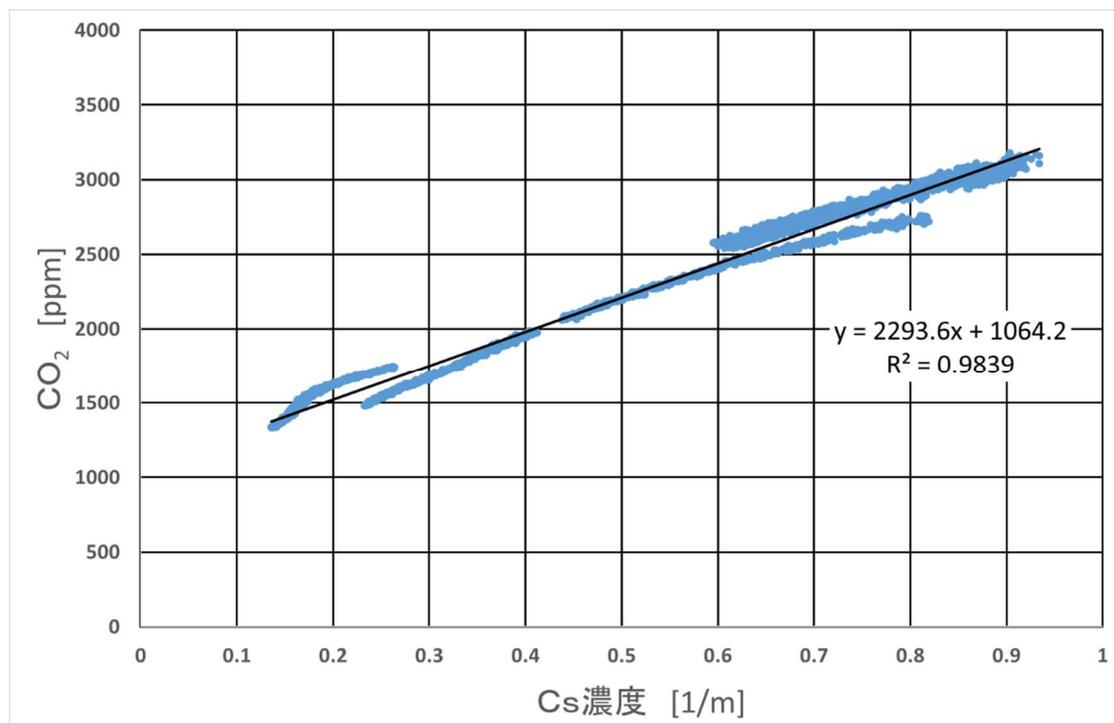


図 2-17 Cs 濃度と LGS による CO<sub>2</sub> 計測値との相関 (灯油燃焼時)

## 2.4 考察

第2章では、車両火災を想定して炎発出前のくすぶり期で発生する煙粒子、有害ガス、周辺光量の変化を検出できる可能性ある SS, LGS, PDS を選出し、煙中でのセンサの出力特性を確認した。実験は密閉した模型トンネル内でエタノール、n-ヘプタン、灯油を燃焼して煙を発出させて、均一に充満させた状態で各センサの計測結果を記録した。同時に模型トンネル内の Cs 濃度を計測し、各センサの出力値との相関を確認した。

SS は模型トンネル内の気流の流動が少なく、センサ内に煙が取込めなかったため反応しなかったが、LGS で計測した CO<sub>2</sub> 濃度および PDS での出力電圧比は、Cs 濃度と定性的な相関を確認できた。このことにより LGS, PDS は炎発出前のガス濃度や周辺光量を計測し火災の初期段階を検出できる可能性が確認された。SS は次章で実施する実大トンネルを使用した有風下での火災実験において確認することとした。

### 3. 実大トンネル A における火災実験

#### 3.1 実験の概要

予備実験で PDS, LGS は出力値と Cs 濃度に一定の相関があることが確認できたため, SS を含む各センサが実大トンネル内で流動する煙やガスを捉えられるのかを確認するものであり, 実験はつくば市の国土交通省国土技術政策総合研究所が所有する延長 700m, 断面積 57m<sup>2</sup> の実物大実験用トンネル (コンクリート製) において各センサの性能確認を行った。

図 3-1 に実物大実験用トンネルの外観を示す。



図 3-1 実物大実験用トンネルの外観<sup>33)</sup>

### 3.2 実験装置の概要

実験装置は図 3-2 に示すとおり、坑口から 465m の車道中央に 1m<sup>2</sup> 火皿の火源を配置した。火源から 10m, 20m, 40m, 70m, 110m 離れたトンネル頂部横断方向に Cs 濃度計（投光部-受光部）を設置した（図 3-2 内の [C]）。同様に火源より 40m, 70m, 110m 離れたトンネル頂部に受光部を路面に向けた PDS を配置した（図 3-2 内の [P]）。SS は火源より 10m, 20m, 40m 離れた側壁部照明灯具近傍に設置した（図 3-2 内の [S]）。LGS は火源を縦断方向に跨ぐようにトンネル側壁近傍に高さを変えて上下 2 箇所と火源より 20m 離れた位置でトンネル横断方向を計測する 1 箇所計 3 箇所設置した（図 3-2 内の [L]=[R]）。炎検知型の火災検知器は火源より 20m 離れた側壁に設置した（図 3-2 内の [F]）。トンネル内風速は、トンネル内に設置した風速計の計測値からジェットファン回転数を制御することにより一定風速に制御した。実験に使用した発煙源・発熱源の仕様を表 3-1 に示す。

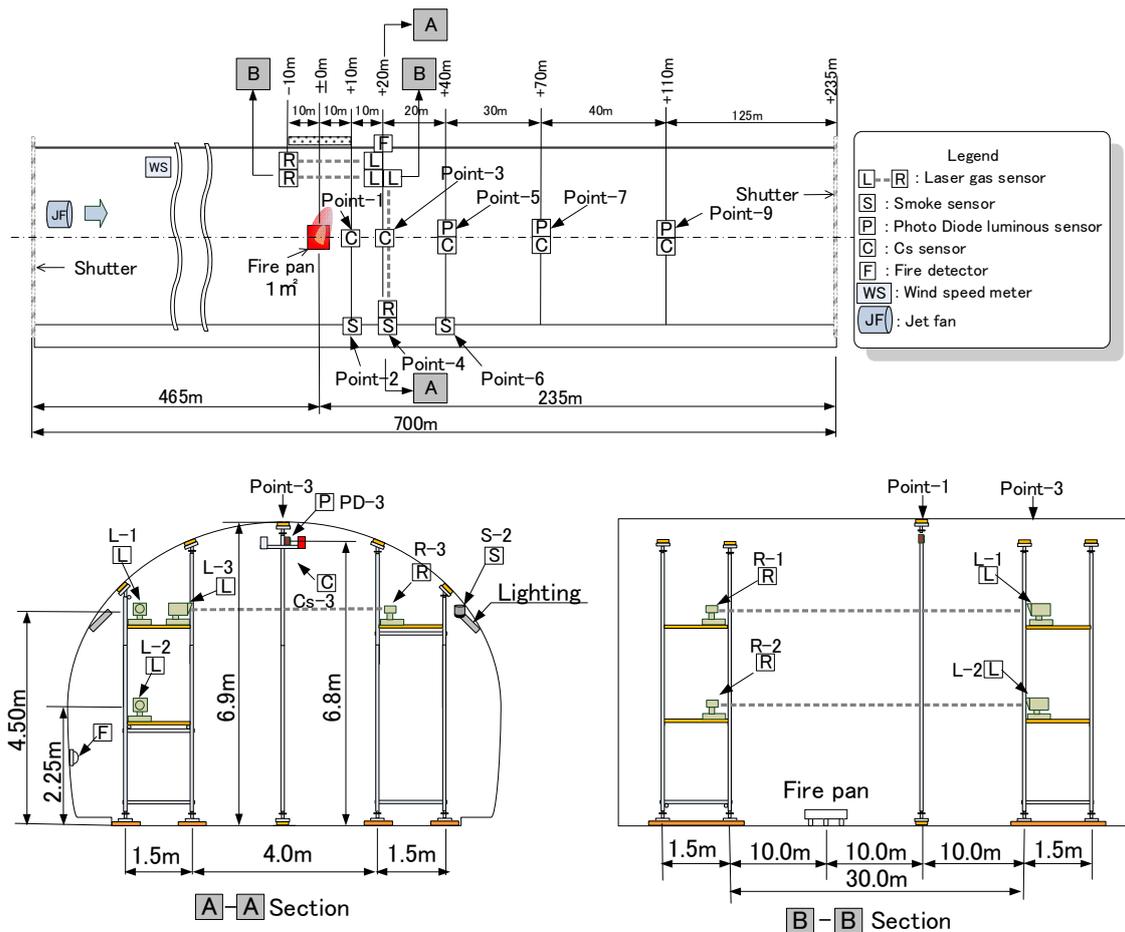


図 3-2 実大トンネル A 火災実験のセンサ配置

表 3-1 発煙源・発熱源の仕様

機材	用途	発生手法	仕様等
n-ヘプタン	車両火災を想定した火源	1m <sup>2</sup> 火皿に入れた n-ヘプタンに着火させ、炎と熱・煙を発生	無色の引火性液体，化学式 C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> CAS 登録番号 142-82-5 濃度 95%以上
発煙筒	くすぶり期を想定した発煙	ベンゲル発煙剤（六塩化エタン，亜鉛華，亜鉛末）を加熱燃焼させ白色煙を発生	昭和火工社製気密試験用発煙筒（大）（白色煙） 発煙時間 約 5 分

### 3.3 実験ケースの設定

また実験ケースは表 3-2 に示すとおり、炎が発出しないくすぶり期の有無とトンネル内風速の有無によるセンサの反応に着目して実験を行った。トンネル内風速の設定は、過去のトンネル火災実験時に多く用いられていることや、いくつかの長大トンネルで火災発生時に煙の排出や拡散抑制のために制御される風速を参考に決定した。

図 3-3、図 3-4 に実験中の状況写真を示す。

表 3-2 実験ケース

Case	風速	発煙源	発煙時間	火源	検証するセンサ
1-1 くすぶり期無し	2m/s	n-ヘプタンの燃焼 による発煙	約 10 分間	1m <sup>2</sup> 火皿で 46ℓ の n-ヘプタンを燃焼	SS, PDS, LGS
1-2 くすぶり期無し	0m/s				PDS, LGS (風速 0m/s のた めセンサ内に煙が 取込まれないこと から SS は除外)
2-1 くすぶり期有り	2m/s	白色発煙筒	約 5 分間発煙 (5 本ずつ 2 回発煙)	なし	SS, PDS (発煙筒の煙に CO <sub>2</sub> が含まれない ため LGS は除外)
2-2 くすぶり期有り	0m/s				PDS (風速 0m/s のた めセンサ内に煙が 取込まれないこと から SS は除外) (発煙筒の煙に CO <sub>2</sub> が含まれない ため LGS は除外)



図 3-3 実大トンネル火災実験状況写真  
(くすぶり期有り 風速 2m/s, 30 秒後, 風上側 30m から撮影)



図 3-4 実大トンネル火災実験状況写真  
(くすぶり期無し 風速 2m/s, 1 分後, 風上側 30m から撮影)

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 Case1(くすぶり期無し)の実験結果

Case1-1 では坑内風速 2m/s, Case1-2 では坑内風速 0m/s のもと, 火源となる 1m<sup>2</sup> 火皿に n-ヘプタン 46l (約 10 分間燃焼) を注ぎ, 点火後に発生する燃焼煙と有害ガスの検出特性について確認したものである. 各計測結果図の横軸は点火時刻を 0 秒とし, 点火後の経過時間を示している.

##### a) SS の実験結果

図 3-5 は Case1-1 の計測ポイント point6 (火源から 40m 側壁) に設置した SS と point5 (火源から 40m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである. Cs 濃度は左縦軸により青色実線で示した. 煙を捉えて大きく Cs 濃度が変化するタイミングは 25 秒後 (青色三角マーク) で, 煙が風速 2m/s に押し流されて計測ポイントに到達する時間と概ね一致する. また, SS で計測された散乱光量を右縦軸により橙色実線で示した. 散乱光量が大きく変化したのは 33 秒後 (橙色三角マーク) で Cs 濃度計の反応より 8 秒遅れている. これは, Cs 濃度計はトンネル頂部への設置に対し, SS をトンネル側壁に設置したため火源から発生した煙が縦流風速の影響で横断方向への広がりが抑制されたと考えられる. 反応に遅れはあるが, 反応後は表示単位が異なるものの計測値は 20 秒間程度急上昇傾向にあり煙の到達を示している.

図 3-6 は Case1-1 の計測ポイント point2 (火源から 10m 側壁) に設置した SS と point1 (火源から 10m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである. SS は図 3-5 同様, Cs 濃度計よりも遅れて反応を開始し急上昇する. 火源から 10m 地点では火源に近く 2m/s の縦流風に煙が押し流されるため, 継続的に反応していないが, 煙が到達して反応していると考えられる.

図 3-7 は Case1-1 の計測ポイント point4 (火源から 20m 側壁) に設置した SS と point3 (火源から 20m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである. SS は図 3-5 同様, Cs 濃度計よりも遅れて反応を開始し急上昇する. 各計測地点で同様の傾向が捉えられているため, SS は設置位置による反応時刻の違いは見られるものの確実に煙の到達を捉えることを確認した.

なお, Case1-2 では風速 0m/s に設定したことから, SS はセンサ周辺に気流が無くセンサ内に煙が取込まれないため, 計測できないことから除外した.

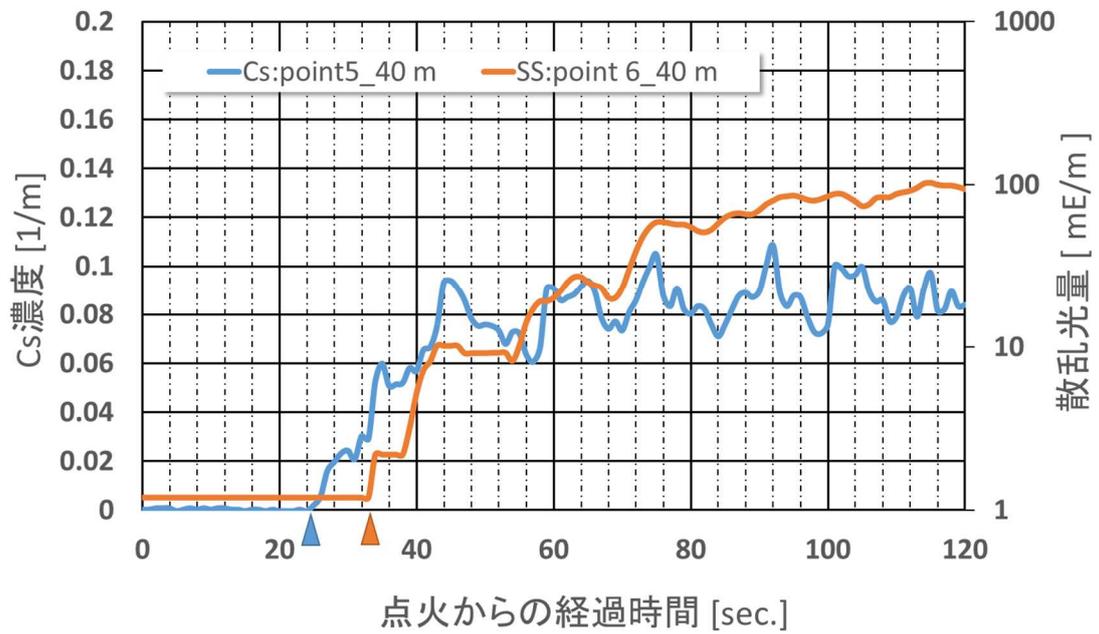


図 3-5 SS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1 火源から 40m)

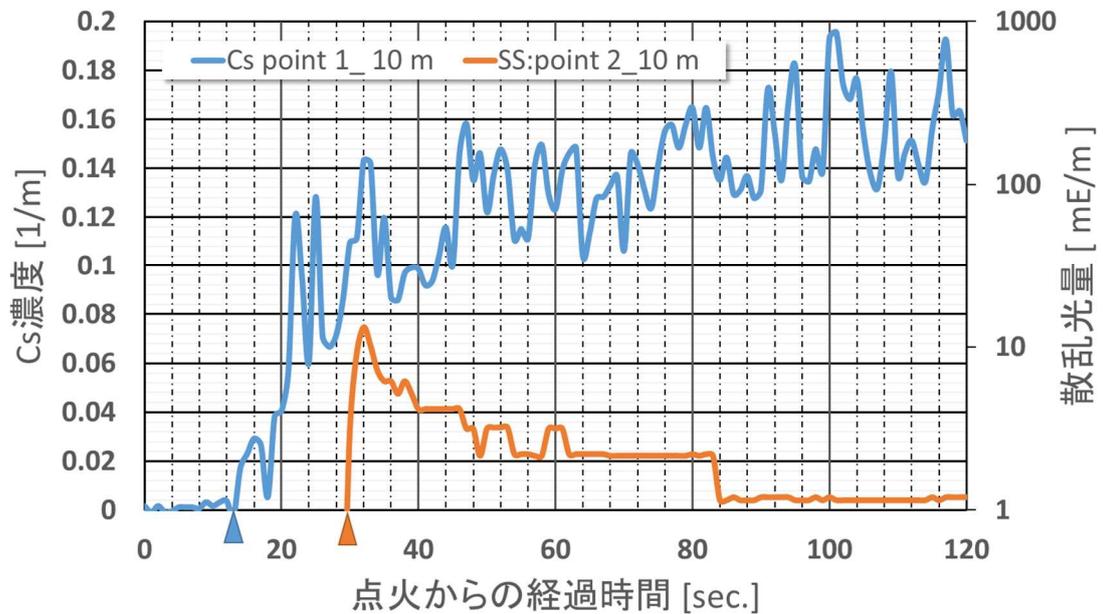


図 3-6 SS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1 火源から 10m)

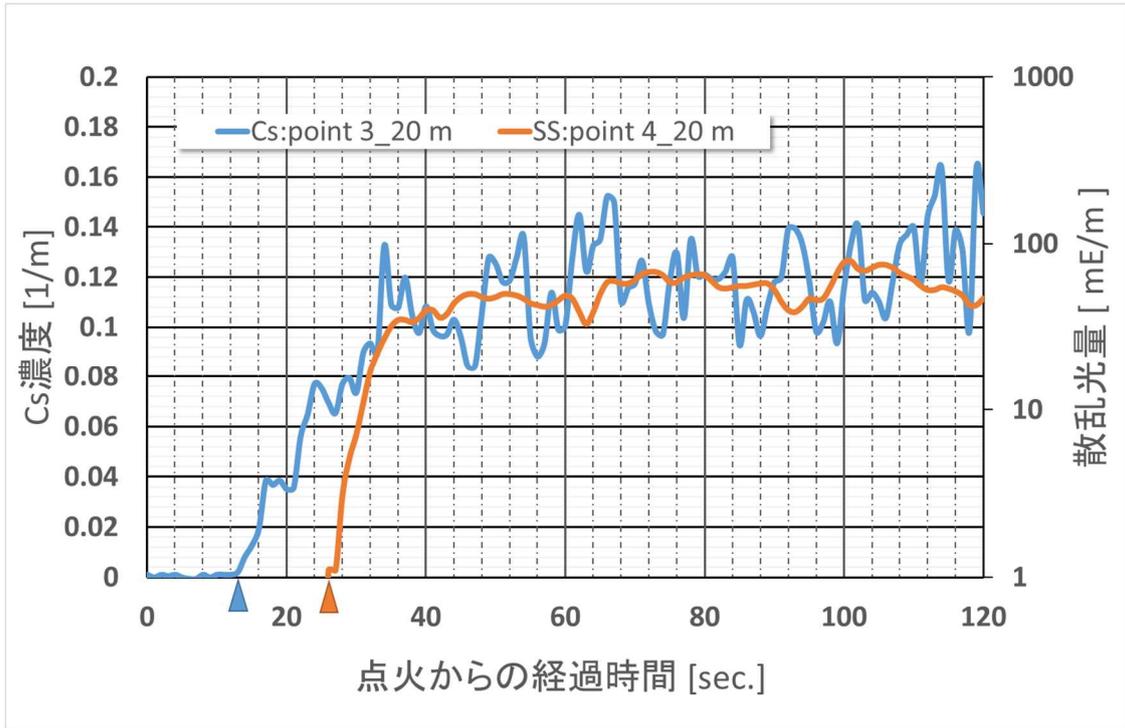


図 3-7 SS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1 火源から 20m)

## b) PDS の実験結果

図 3-8 は Case1-1 の計測ポイント point5 (火源から 40m トンネル頂部) に設置した PDS の電圧比と Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。本実験で PDS はトンネル頂部から路面までの空間を俯瞰して光量を計測しており、その空間に煙が進入することにより受光量が減少して電圧比が低下するものと想定していた。しかし、このケースでは Cs 濃度計が反応する 24 秒 (青色三角マーク) 以前に PDS の電圧比が点火直後 4 秒 (橙色三角マーク) から 1.0 を上回り、上昇した電圧比は 20 秒付近 (橙色逆三角マーク) から徐々に低下し、31 秒で 1.0 となり (白抜き橙色三角マーク)、その後漸減している。

図 3-9 は Case1-1 の計測ポイント point7 (火源から 70m トンネル頂部) に設置した PDS の電圧比と Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。point7 でも、Cs 濃度計が反応する 42 秒 (青色三角マーク) 以前に PDS の電圧比が 1.0 を超え 51 秒まで (白抜き橙色三角マーク) 継続している。電圧比は 21 秒付近 (橙色逆三角マーク) でピークを迎え、その後、51 秒で 1.0 を下回り漸減している。

図 3-8, 図 3-9 の結果より、点火後 PDS の反応開始から 20 秒までの間は、火源の火皿から立ち上る炎が発する光を捉えるため電圧比が 1.0 を超え、その後風下側に移動する煙が火源と PDS 俯瞰区画の間に進入することで少しずつ光量が減少し、更に Cs 濃度計および PDS 設置箇所周囲に煙が到達して煙濃度が高まり、PDS が俯瞰する区画の光量が低下してゆくプロセスを計測したものと推測される。電圧比がピークを迎える時刻は point5, point7 ともほぼ同じ時刻であり、火源より 70m 離れた地点でも火源火皿の炎を捉えたものと考えられる。その後、電圧比が 1.0 以下に減衰するまでの時間は point7 の PDS が 20 秒程度 (橙色逆三角マークから白抜き橙色三角マークまで) 遅れている。これは発煙源から発生した煙が坑内風速 2m/s に押し流されながら徐々にトンネル内へ拡散していくためであると考えられる。また、point5, point7 とも Cs 濃度計の反応後、10 秒前後で PDS の電圧比は 1.0 を下回っている。これは PDS に煙が到達して周辺光量が実験開始前より減少したことを示している。

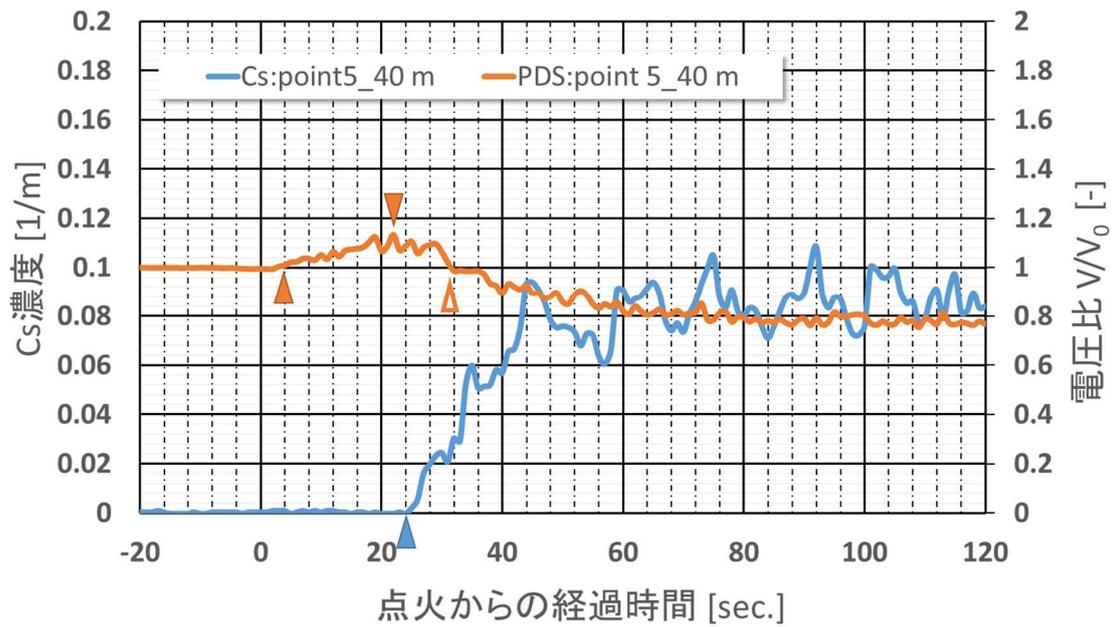


図 3-8 point5 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1)

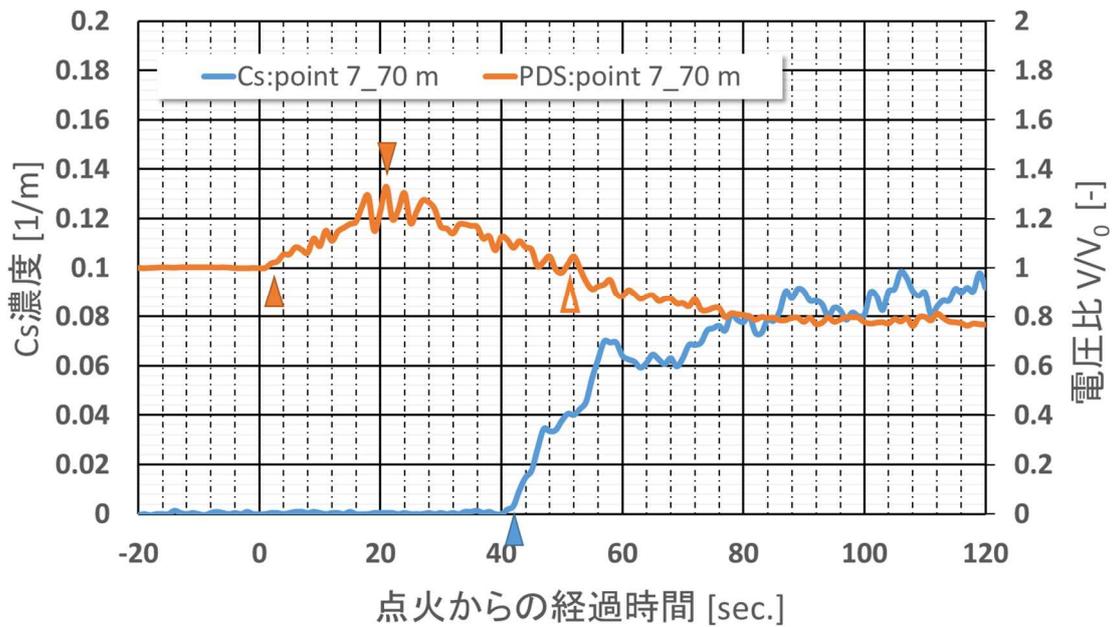


図 3-9 point7 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1)

図 3-10 は Case1-2 の計測ポイント point5（火源から 40m トンネル頂部）に設置した PDS の電圧比と Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。このケースでも Cs 濃度計が反応する 39 秒（青色三角マーク）以前に PDS の電圧比が点火直後 4 秒（橙色三角マーク）から 1.0 を上回り、上昇した電圧比は 30 秒付近（橙色逆三角マーク）から徐々に低下し、41 秒で 1.0 となり（白抜き橙色三角マーク）、その後漸減している。この挙動はトンネル内風速が異なるため、反応時刻は異なるものの Case1-1 の挙動と同様である。PDS が反応を開始する時刻は点火直後 4 秒と同じであるため、火点の炎が発する光を捉えたものと考えられる。

図 3-11 は Case1-2 の計測ポイント point7（火源から 70m トンネル頂部）に設置した PDS の電圧比と Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。point7 でも、Cs 濃度計が反応する 60 秒（青色三角マーク）以前に PDS の電圧比が 1.0 を超え 61 秒まで（白抜き橙色三角マーク）継続している。電圧比は 28 秒付近（橙色逆三角マーク）でピークを迎え、その後、61 秒で 1.0 を下回り漸減している。計測ポイント point7 でも Case1-1 の挙動と同様である。

図 3-10、図 3-11 の結果より、点火後 PDS の反応開始から 20 秒までの間は、火源の炎が発する光を捉えて電圧比が 1.0 を超え、その後煙が火源と PDS 俯瞰区画の間に進入して少しずつ光量が減少し、更に Cs 濃度計および PDS 設置箇所周囲に煙が到達して煙濃度が高まり、PDS が俯瞰する区画の光量が低下してゆくプロセスを計測したものと推測される。電圧比がピークを迎える時刻は point5、point7 とほぼ同じ時刻であり、火源より 70m 離れた地点でも火源火皿の炎を捉えたものと考えられる。その後、電圧比が 1.0 以下に減衰するまでの時間は point7 の PDS が 20 秒程度（橙色逆三角マークから白抜き橙色三角マークまで）遅れている。これは発煙源から発生した煙が火源からの熱気流に押し流されながら徐々にトンネル内へ拡散していくためであると考えられる。また、point5、point7 とともに Cs 濃度計の反応とほぼ同時に PDS の電圧比は 1.0 を下回っている。これは PDS に煙が到達して周辺光量が実験開始前より減少したことを示している。これらの挙動は Case1-1 の結果と同様であった。以上のことから、PDS の電圧比が 1.0 を超える要因は、火源の燃焼炎を捉えること、その後電圧比が低下するのは、トンネル内を流動し拡散していく煙により火源炎や照明光の光量が徐々にさえぎられるためであると考えられる。PDS の煙検出特性は、俯瞰している区画の光環境の変化を捉えるが、煙により電圧比が 1.0 以下に減少するだけでなく、火源が発する炎および照明光が煙に反射する光を受光することにより電圧比が 1.0 以上に上昇するケースがあることを把握した。

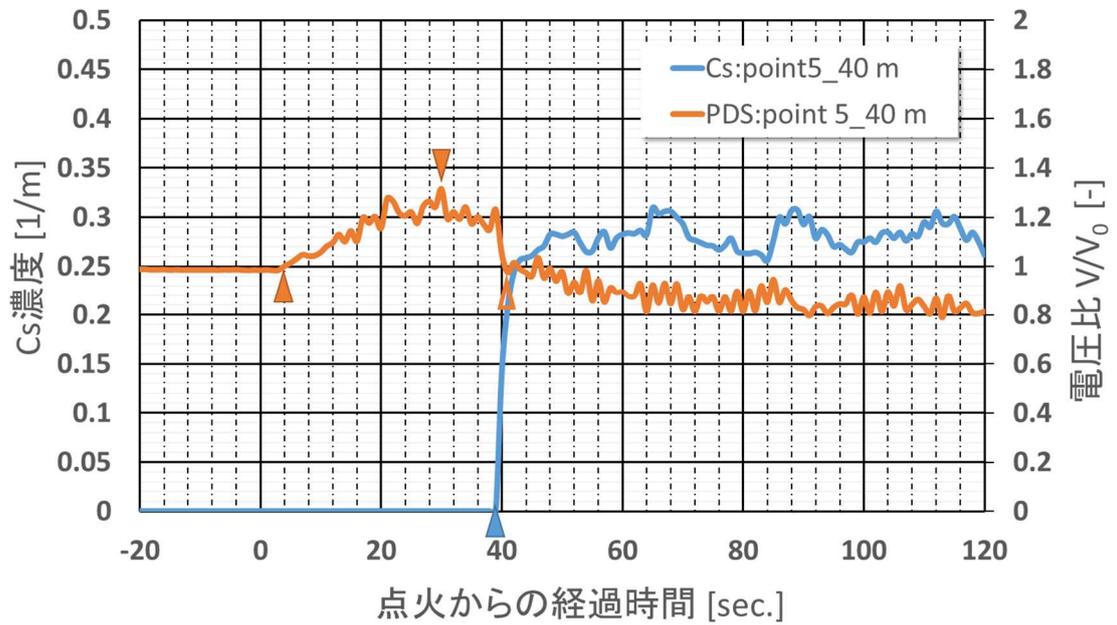


図 3-10 point5 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-2)

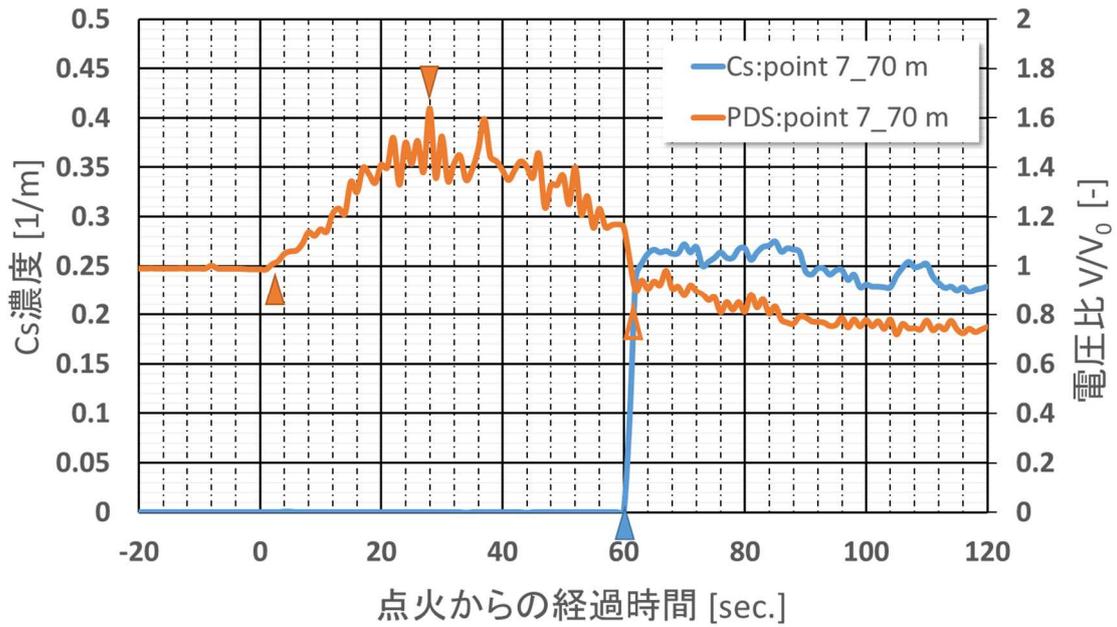


図 3-11 point7 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-2)

### c) LGS の実験結果

図 3-12 は Case1-1 の火源から 20m の地点に横断方向を計測するように設置した L-3 (図 3-2) で計測した CO<sub>2</sub> 濃度と point3 (火源から 20m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。LGS は点火後 10 秒から CO<sub>2</sub> 濃度が上昇しはじめ、point3 の Cs 濃度計も 14 秒で大きく反応している。その後も CO<sub>2</sub> 濃度と Cs 濃度は共に 20 秒間程度上昇し、その後も 60 秒まで CO<sub>2</sub> は上昇を続けている。Cs 濃度計反応開始後の 20 秒間の CO<sub>2</sub> 濃度と Cs 濃度の上昇傾向は概ね一致することから、CO<sub>2</sub> 濃度の測定を行うことで煙の到達を捉えられることが示唆された。

トンネル縦断方向に光軸を向け、光軸高さを 4.5m に設置した上段 L-1 (図 3-2) の計測結果 (図 3-13) は横断方向に設置した L-3 の計測結果 (図 3-12) と同様の反応を示した。しかし、光軸高さを 2.25m に設置した下段 L-2 (図 3-2) の計測結果 (図 3-14) では火源の熱気流により煙や CO<sub>2</sub> がトンネル上部に上昇し、風速 2m/s で押し流れるため CO<sub>2</sub> 濃度変化は明確には捉えられていない。このため、LGS はトンネル断面方向で計測することが理想的であると考えられるが、実際のトンネルでは車両が走行するため、建築限界よりも高い位置へ設置する必要がある。しかし、維持管理面に配慮すると点検のために交通規制が必要となる。一方、同じ高さ 4.5m で縦断方向に設置した L-1 でも L-3 と遜色のない傾向が得られており、縦断方向に設置することで同様の検知性能と維持管理性を両立する可能性が高い。

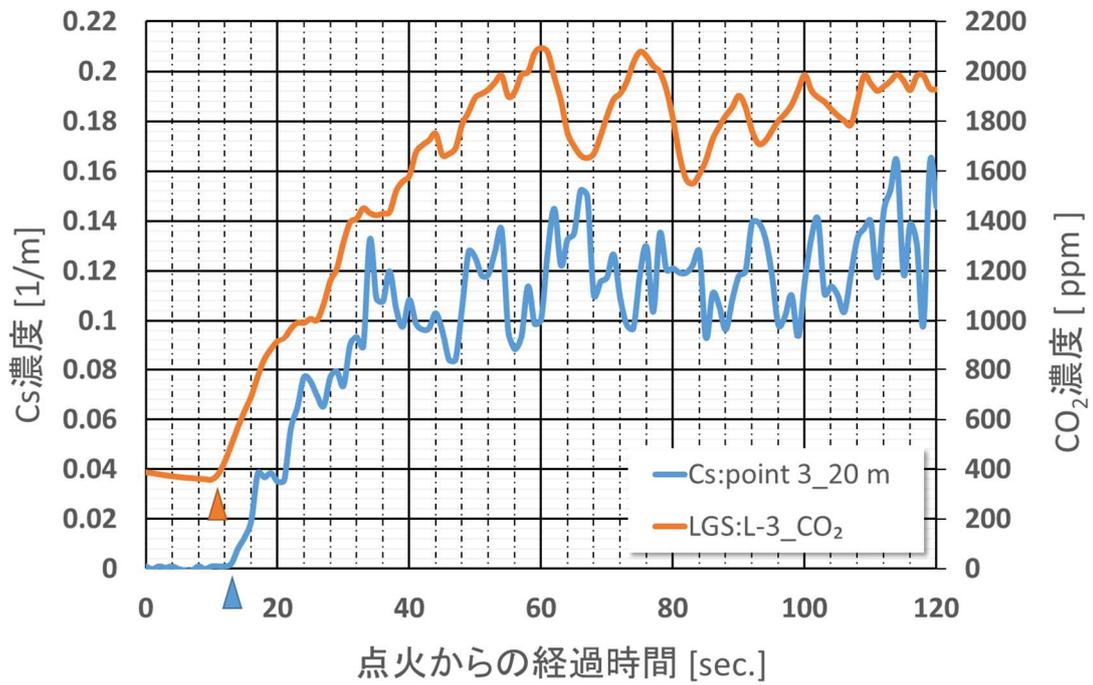


図 3-12 LGS 横断 (L-3) と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1)

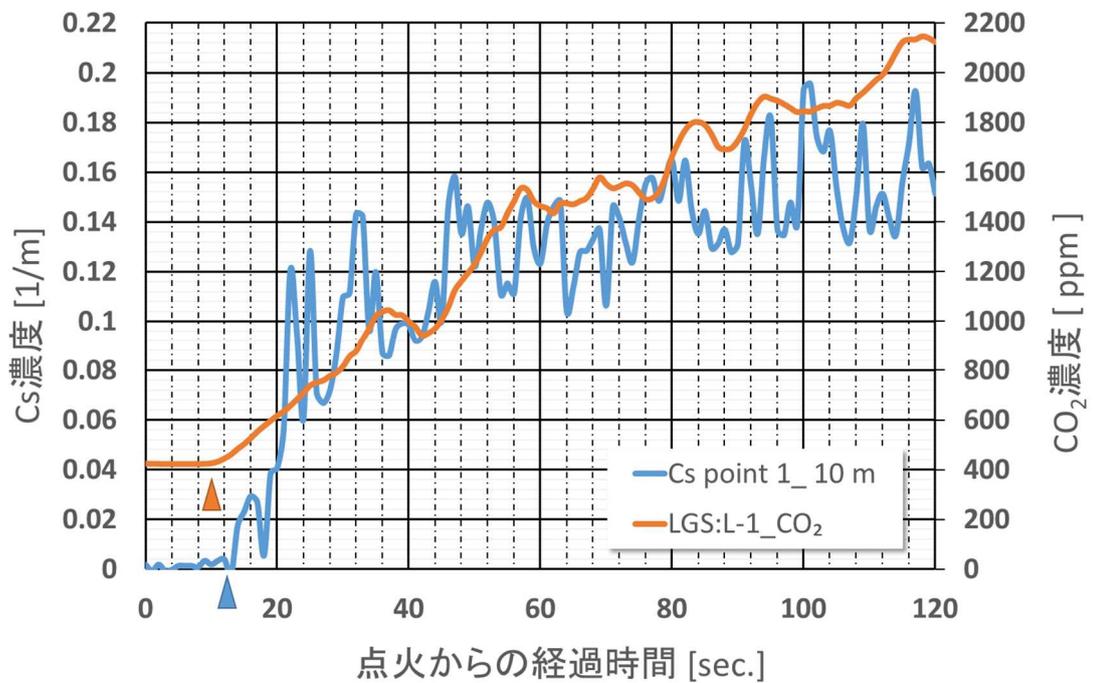


図 3-13 LGS 縦断上段 (L-1) と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1)

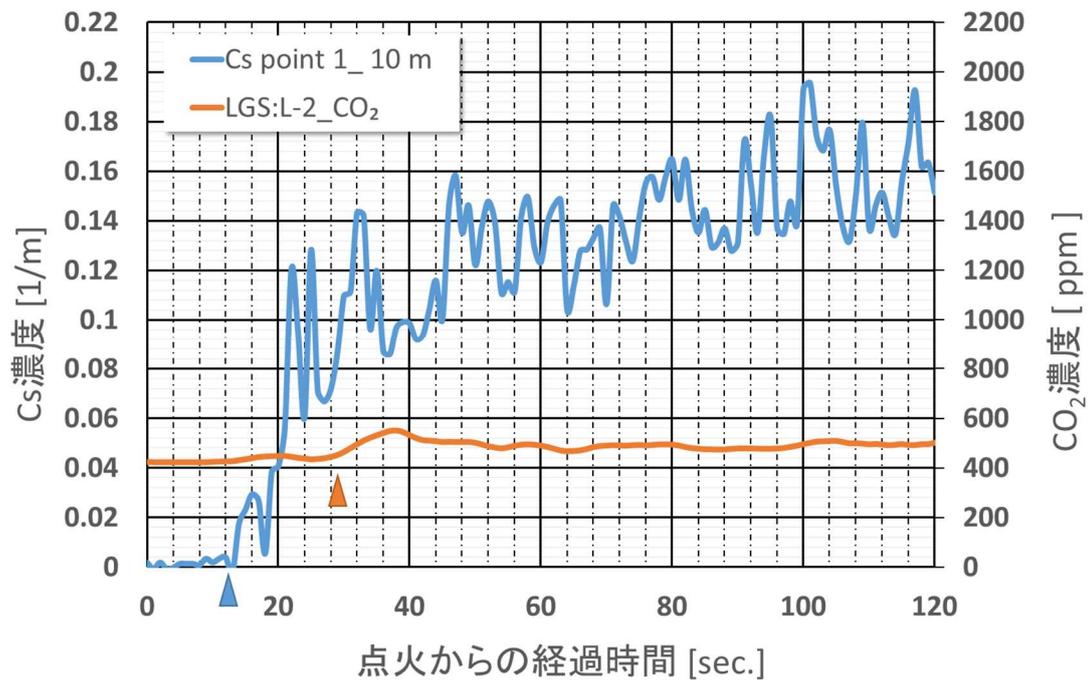


図 3-14 LGS 縦断下段 (L-2) と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-1)

図 3-15 は Case1-2 の火源から 20m の地点に横断方向を計測するように設置した L-3 (図 3-2) で計測した CO<sub>2</sub> 濃度と point3 (火源から 20m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。Cs 濃度は 23 秒で大きく上昇しているが LGS は 27 秒後に若干上昇している状況である。これはトンネル内風速を 0m/s に設定したため火源から発生した煙や CO<sub>2</sub> は、熱気流によりほぼ垂直に上昇してトンネル頂部に達したのち頂部に沿ってトンネル縦断方向に拡がっていくため、トンネル頂部付近に設置した Cs 濃度は反応したが、高さ 4.5m に設置した LGS はほとんど反応しなかったと考えられる。n-ヘプタンの燃焼が終わる点火後約 600 秒前後には LGS が反応しており、Cs 濃度も低下している。これは燃焼終盤に熱気流が減少して煙や CO<sub>2</sub> がトンネル頂部から降下してきたためと考えられる。

トンネル縦断方向に光軸を向け、光軸高さを 4.5m に設置した上段 L-1 (図 3-2) の計測結果 (図 3-16) では LGS は点火後 7 秒から CO<sub>2</sub> 濃度が上昇しはじめ、point1 の Cs 濃度計も 14 秒で大きく反応している。これはトンネル頂部に達した煙や CO<sub>2</sub> が馬蹄形のトンネル壁面に沿って降下し、トンネル壁面近傍に設置した LGS (L-1) の光軸内に達したためと考えられる。Cs 濃度計反応開始後の CO<sub>2</sub> 濃度と Cs 濃度の上昇傾向は概ね一致することから、CO<sub>2</sub> 濃度の測定を行うことで煙の到達を捉えられることが示唆された。

光軸高さを 2.25m に設置した下段 L-2 (図 3-2) の計測結果 (図 3-17) では、火源の熱気流により煙や有害ガスがトンネル上部に上昇し、トンネル壁面に沿って降下してくるが、高さ 2.25m までは降下していないと考えられ、CO<sub>2</sub> 濃度変化は明確には捉えられていない。実際に供用されているトンネルにおいてトンネル内風速が 0m/s となる条件は稀であるが、LGS は高さ 4.5m 程度で縦断方向に設置することで検知性能と維持管理性を両立する可能性が高い。

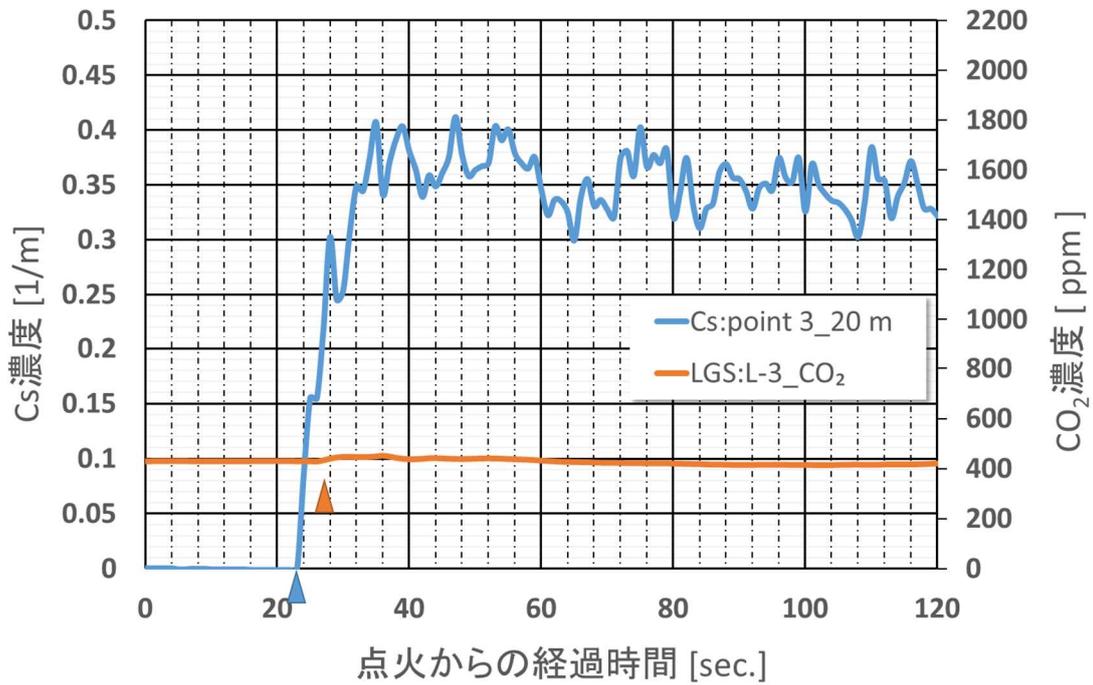


図 3-15 LGS 横断 (L-3) と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-2)

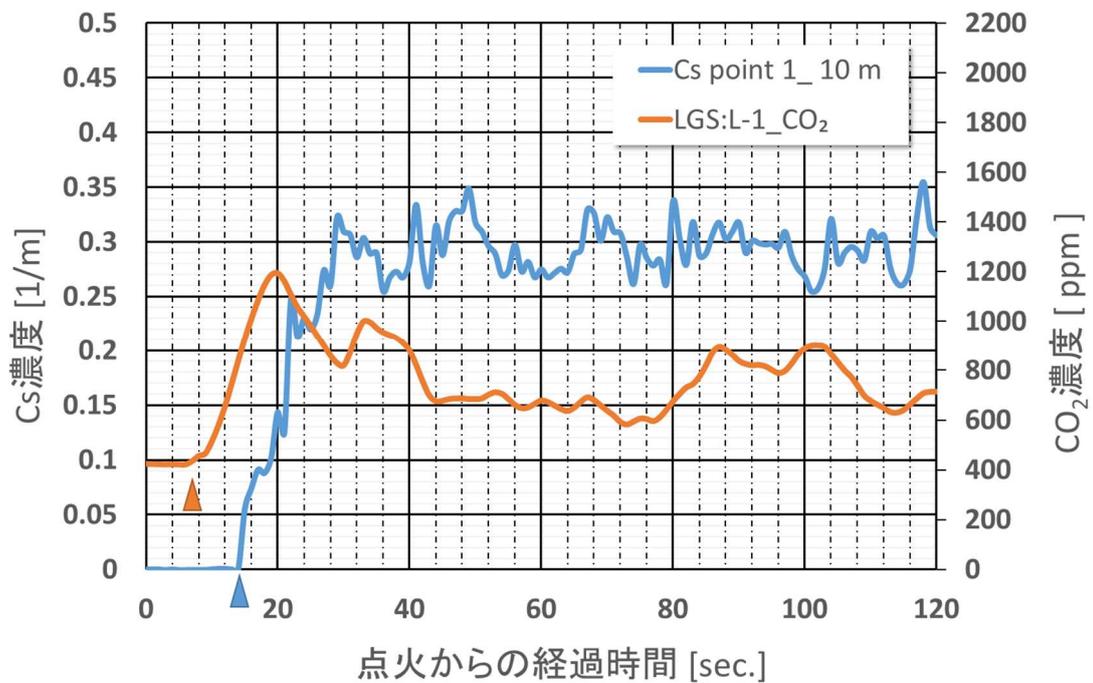


図 3-16 LGS 縦断上段 (L-1) と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-2)

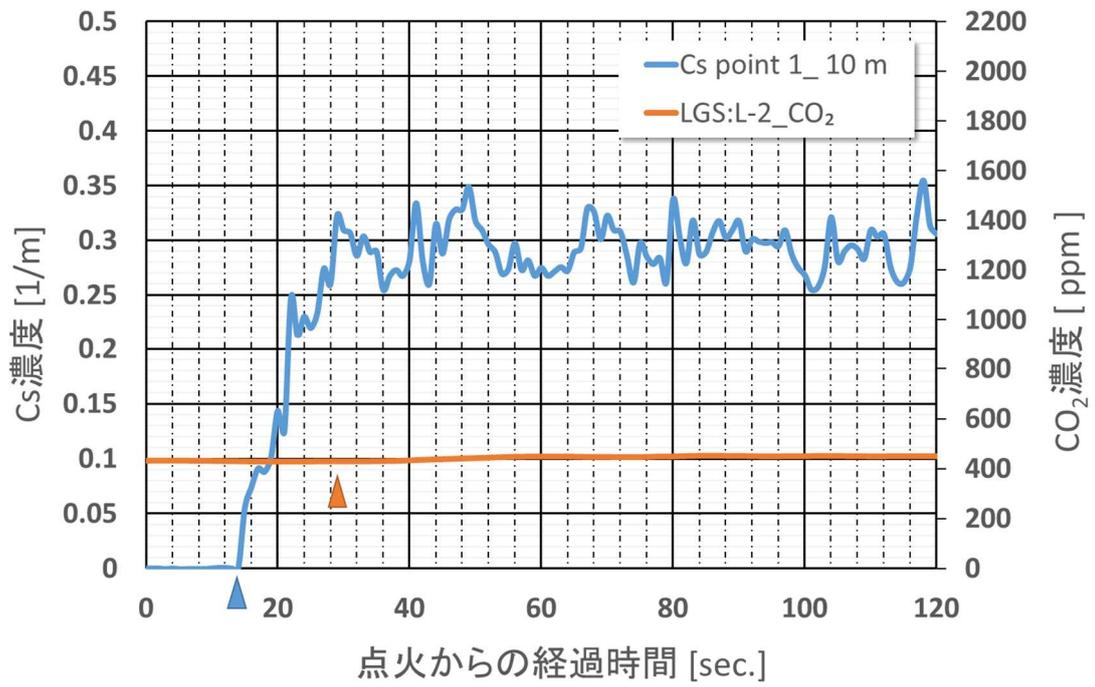


図 3-17 LGS 縦断下段 (L-2) と Cs 濃度計の計測結果 (Case1-2)

### 3.4.2 Case2(くすぶり期有り)の実験結果

Case2-1 では坑内風速 2m/s , Case2-2 では坑内風速 0m/sのもと, くすぶり期を模した発煙筒(白色)を使用し, 各センサの煙検出特性を確認した. 各計測結果図の横軸は発煙開始時刻を 0 秒とし, 発煙開始後の経過時間を示している.

#### a) SS の実験結果

図 3-18 は Case2-1 の計測ポイント point6 (火源から 40m 側壁) に設置した SS と point5 (火源から 40m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである. 煙を捉えて Cs 濃度が変化するタイミングは 49 秒後(青色三角マーク)で, 図 3-5 のへプタンを燃焼させた Case1-1 と比べると 24 秒遅くなっている. これは発煙筒から排出された煙の浮力が僅かであり, 坑内風速 2m/s に押し流されてしまい, トンネル断面全体に拡散浮上する時間を要しているものと考えられる. SS の散乱光量が大きく変化したのは 34 秒後(橙色三角マーク)であり, 図 3-5 の Case1-1 とほぼ同じ時刻である. また, Cs 濃度計より 15 秒早く反応している.

図 3-19 は Case2-1 の計測ポイント point2 (火源から 10m 側壁) に設置した SS と point1 (火源から 10m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである. SS は 28 秒後から若干の反応を示し, 40 秒付近で一旦, 上昇するが, 直ぐに低下している. 一方の Cs 濃度計は煙に反応していない. この理由は発煙筒が発する煙に浮力が殆どなく, 縦流風 2m/s に押し流されトンネル断面に拡散しなかったためである.

図 3-20 は Case2-1 の計測ポイント point4 (火源から 20m 側壁) に設置した SS と point3 (火源から 20m トンネル頂部) に設置した Cs 濃度計の計測結果を比較したものである. SS は 22 秒後から反応し急上昇している. Cs 濃度計は反応せず, 10m 地点と同様の現象が起きているものと考えられる. SS は Cs 濃度計よりも低い位置に設置しており, くすぶりを模した熱気流を有しない煙の検出にはセンサ設置位置が低い方が有利であることを確認した.

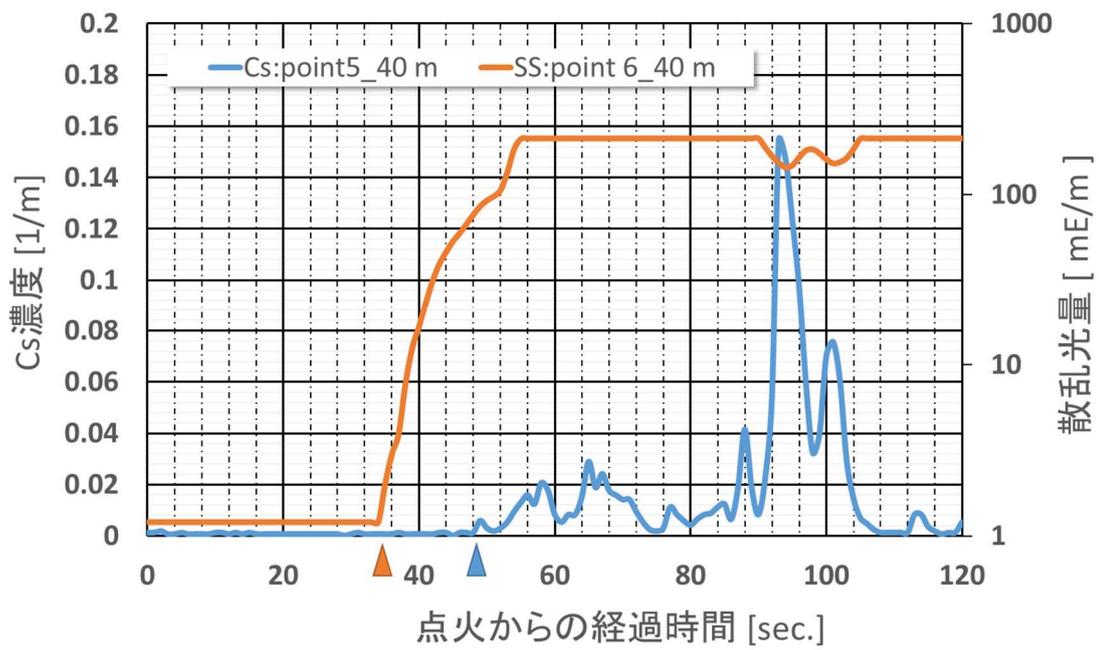


図 3-18 SS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-1 発煙源から 40m)

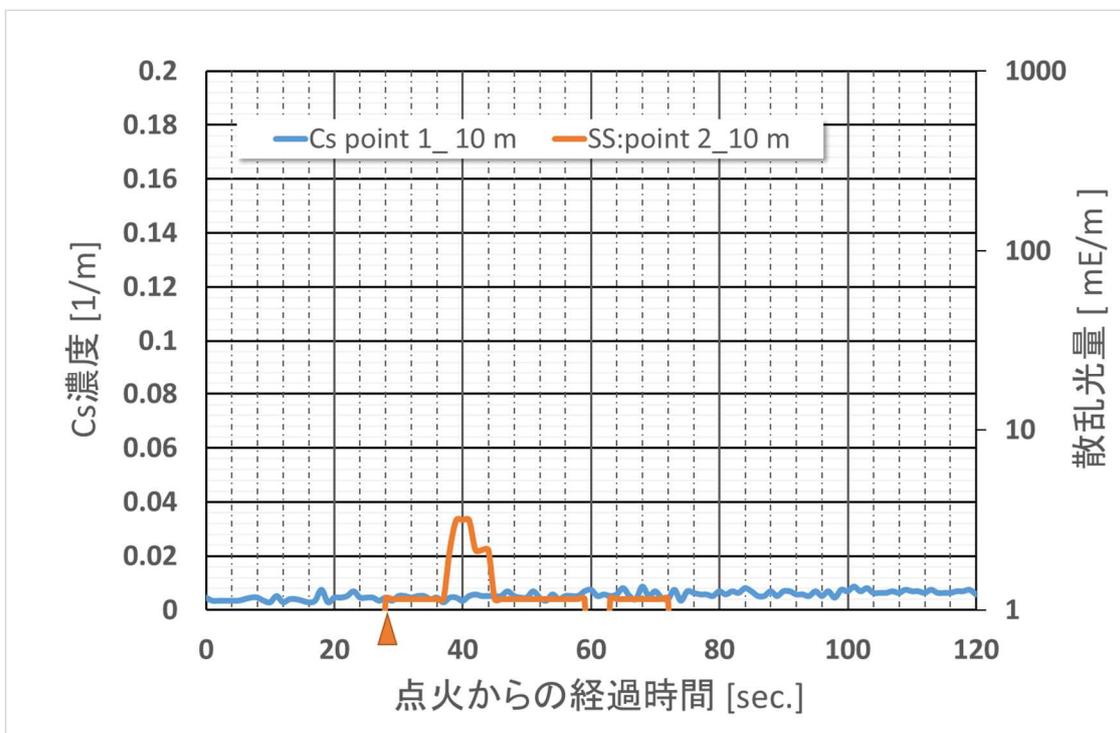


図 3-19 SS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-1 発煙源から 10m)

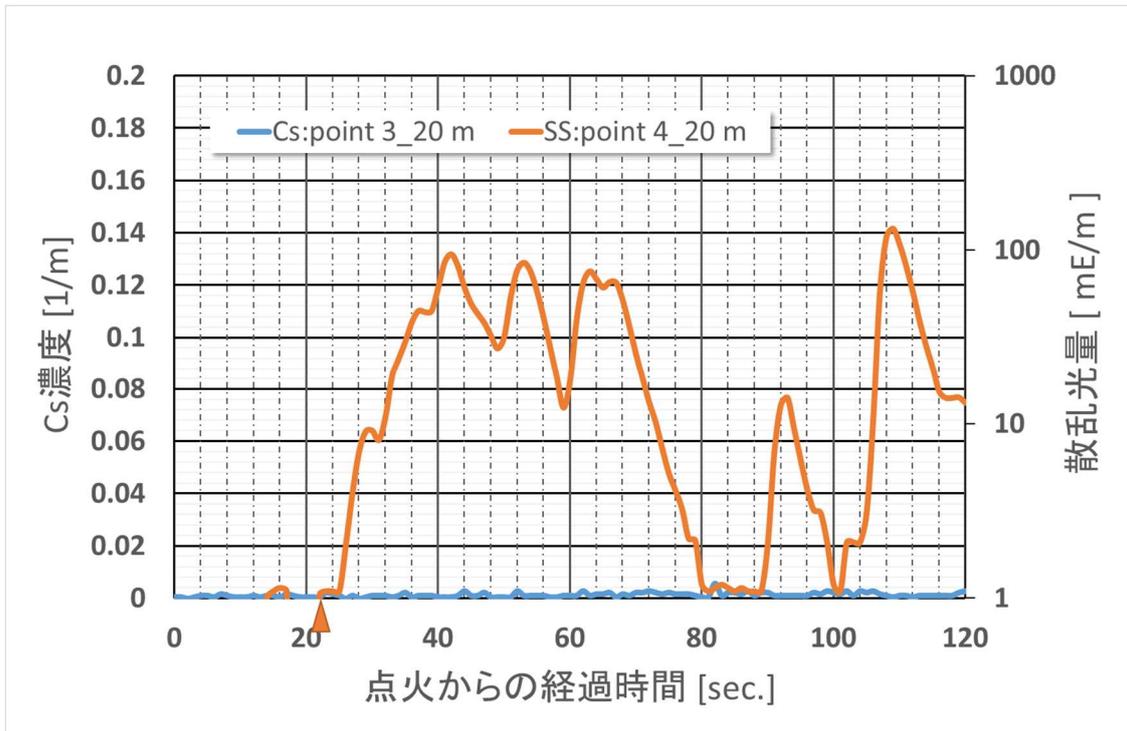


図 3-20 SS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-1 発煙源から 20m)

## b) PDS の実験結果

図 3-21 は Case2-1 (トンネル内風速 2m/s) の計測ポイント point5 (火源から 40m トンネル頂部) に設置した PDS の電圧比と Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。Cs 濃度計が反応するのは 49 秒後 (青色三角マーク) で、PDS は Cs 濃度計の反応より以前に PDS の電圧比が 1.0 を超えている。このように火源に炎がないケースでも電圧比が上昇する要因としては、周囲の照明光が白煙による光幕反射により PDS がトンネル照明の光を実験開始前より多く捉えているものと推測される。煙色や周辺の光環境等と合わせて PDS の計測特性の確認が必要である。この実験では発煙筒の煙が発煙開始から 2m/s の縦流風に押し流された場合、火源から 40m 地点に到達するのは単純計算で 20 秒後となる。PDS の電圧比が上昇することも煙による反応と捉えると point5 での反応開始時刻は発煙開始から 23 秒後 (橙色三角マーク)、Cs 濃度計の検知時刻と比較すると非常に早く反応している。また図 3-22 に示す Case2-1 (トンネル内風速 2m/s) の point7 (火源から 70m トンネル頂部) では、トンネル頂部に設置した Cs 濃度計の反応は 72 秒後であるが、PDS の電圧比の変化は煙が縦流風に押し流されて火源から 70m 付近に到達する時刻 35 秒後 (単純計算) より、むしろ早く検知しており point5 と同様の反応がみられた。

図 3-3 に示す Case2-1 実験中の写真からも発煙筒の煙はトンネル頂部まで届かず、低い位置で坑内風速に押し流されており、煙にトンネル照明光が反射してトンネル内が明るく見えている。図 3-4 は火皿火災 Case1-1 の写真であるが、火源は燃焼により非常に明るく、熱浮力によりトンネル上部に上昇した煙が押し流されトンネル照明光を減光している様子が分かる。

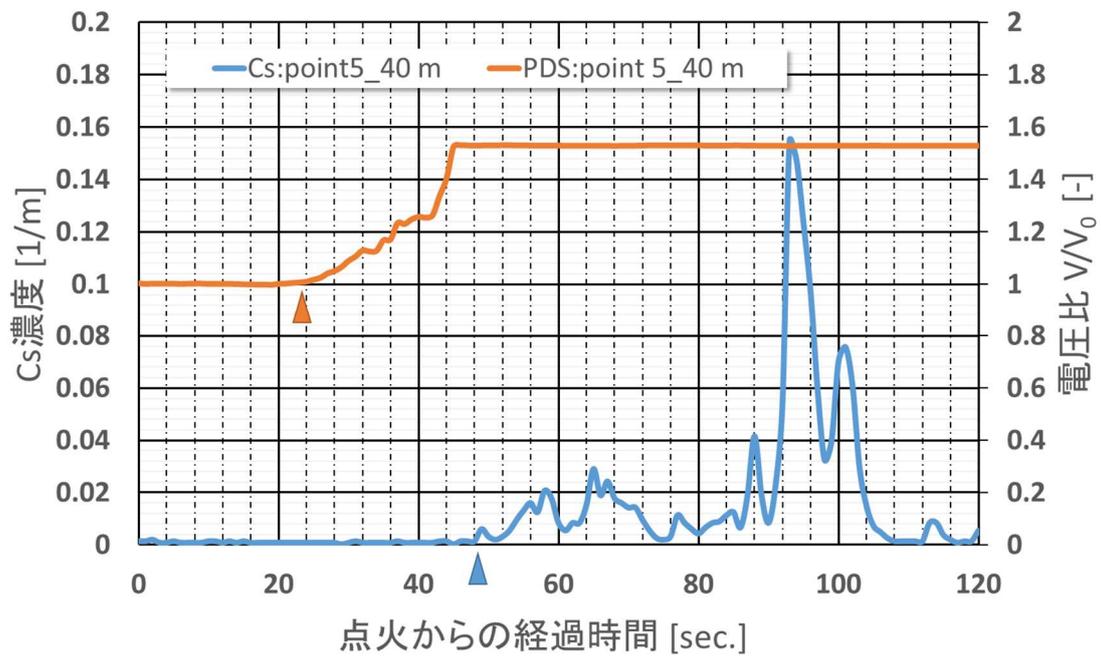


図 3-21 point5 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-1)

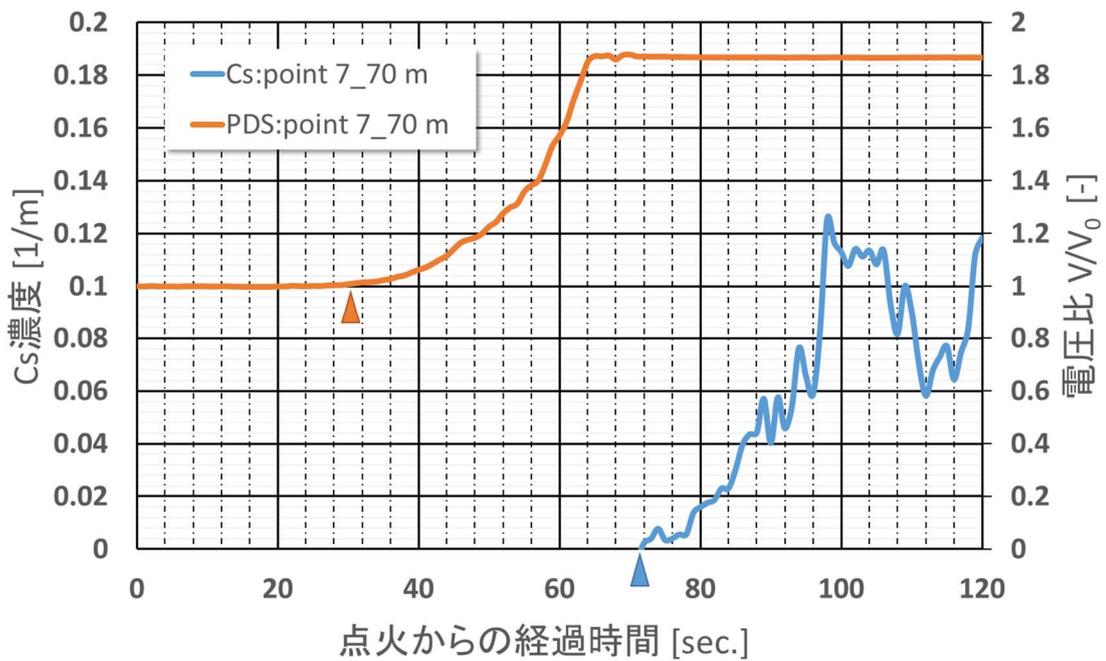


図 3-22 point7 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-1)

図 3-23 は発煙筒からの煙の流れと PDS 及び Cs 濃度計の関係を示したものである。図 3-23 の上図は熱浮力よりもトンネル坑内縦流風の慣性力が大きく、煙が押し流されている様子を模している。この時 Cs 濃度計は反応しないが、トンネル頂部から路面方向を俯瞰している PDS は周辺の光量変化を捉え、センサ設置部に煙が到達しなくても反応を示す。

図 3-23 の下図は煙がトンネル内の縦流換気風に押し流されながら熱浮力によりトンネル頂部まで到達した場合を模している。この時は Cs 濃度計にも煙が到達して反応している。また、PDS 設置箇所の周囲に煙が到達すると、光量が減少する。このことから PDS はセンサ設置位置に影響されにくく、光量の変化から煙の存在を検出できる可能性があることが示唆された。

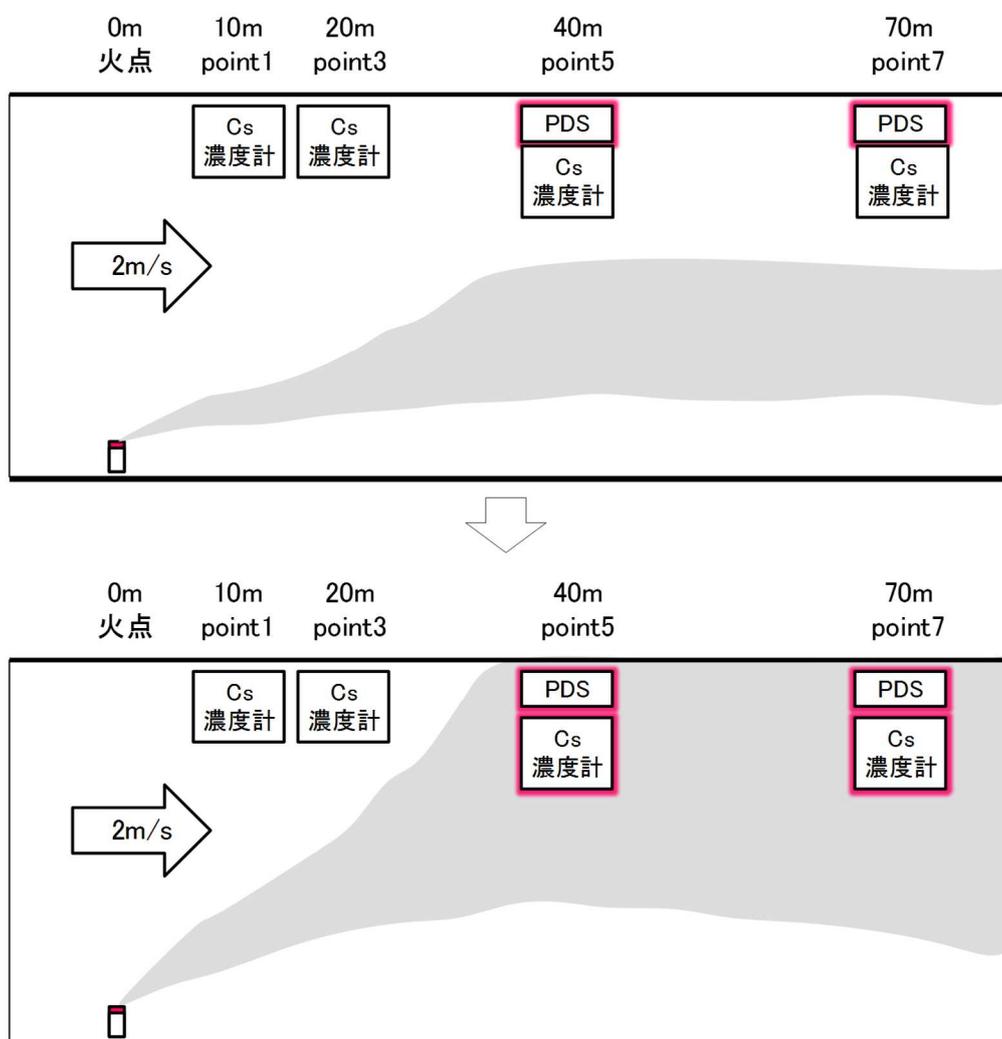


図 3-23 発煙筒からの煙の流れとセンサ反応イメージ図

図 3-24 は Case2-2 (トンネル内風速 0m/s) の計測ポイント point5 (火源から 40m トンネル頂部) に設置した PDS の電圧比と Cs 濃度計の計測結果を比較したものである。Cs 濃度計が反応するのは 193 秒後 (青色三角マーク) で、PDS は Cs 濃度計の反応とほぼ同時に PDS の電圧比が 1.0 を超えている。Case2-1 同様に電圧比が上昇する要因としては、周囲の照明光が白煙による光幕反射により PDS がトンネル照明の光を実験開始前より多く捉えているものと推測される。この実験では発煙筒の煙が発煙開始から発煙筒の弱い熱気流によりトンネル頂部を縦断方向に拡がるため、煙が PDS 近傍に達するまで受光量の変化は少なく、センサ付近に煙が到達した時に Cs 濃度計と同時に反応したと考えられる。また図 3-25 に示す Case2-2 (トンネル内風速 0m/s) の point7 (火源から 70m トンネル頂部) では、トンネル頂部に設置した Cs 濃度計の反応は 297 秒後であるが、PDS の電圧比の変化は 277 秒後であり、Cs 濃度計より早く反応している。これは弱い熱気流によりトンネル頂部に沿って縦断方向に拡がってきた煙が、若干降下して拡散しはじめているからであると想定される。

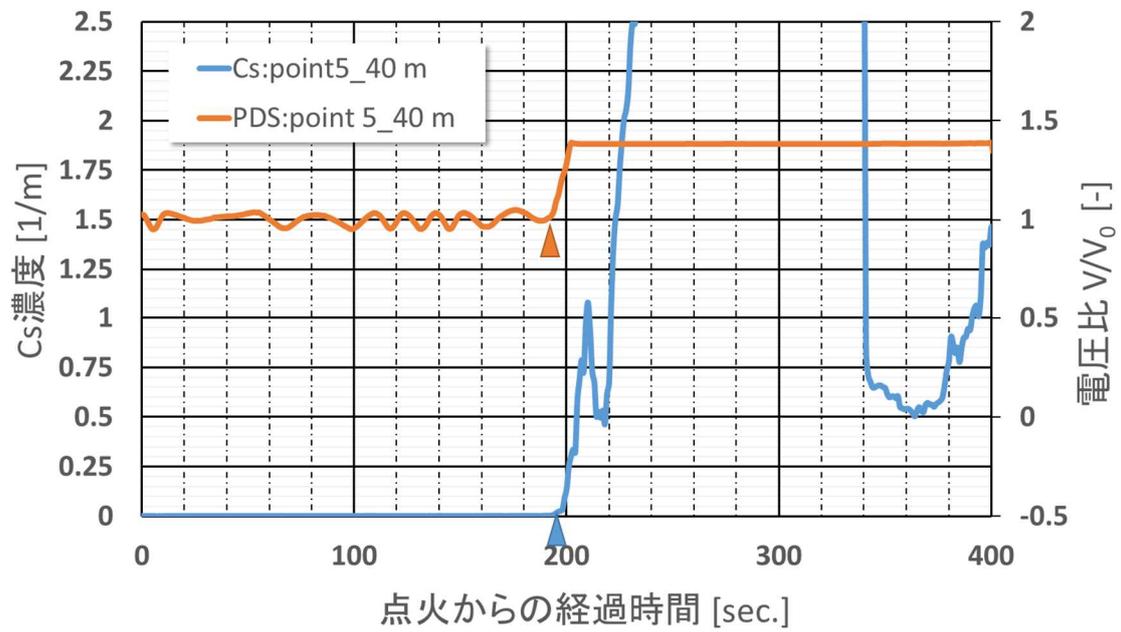


図 3-24 point5 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-2)

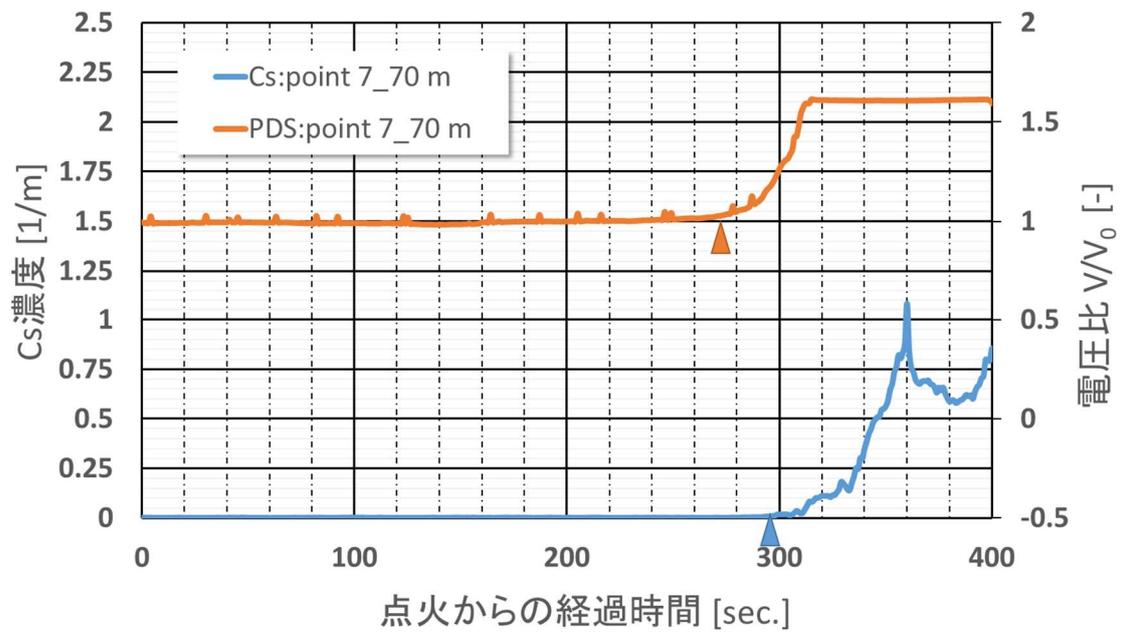


図 3-25 point7 の PDS と Cs 濃度計の計測結果 (Case2-2)

図 3-26 は PDS の光量検出特性（電圧比変化）のイメージを示したものである。これまでの知見では、ガソリンが燃えた場合の黒煙の煙粒子径は凝集・凝縮により  $0.1\sim 100\mu\text{m}$ <sup>34)</sup>とされている。一方、白煙を生成する発煙筒に関しては、実験で  $1.0\mu\text{m}$  以上の煙粒子を捕捉した事例<sup>35)</sup>があり、次章の実験で使用するスモークマシン仕様書でも数  $10\mu\text{m}$  との記載<sup>36)</sup>がある。このことから、本実験で使用した発煙筒の白煙の粒子径は比較的大きく均一的であることから光幕現象により照明光を反射し、PDS の受光量を増加させたものと推測される。

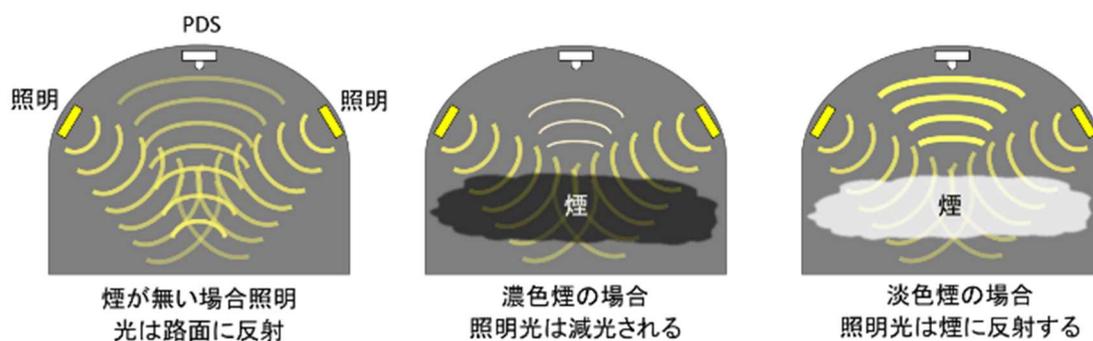


図 3-26 PDS の光量検出（電圧比変化）イメージ

### 3.5 センサ反応時刻まとめ

Case1-1（くすぶり無し，トンネル内風速 2m/s）及び Case2-1（くすぶり有り，トンネル内風速 2m/s）両ケースの各センサの火源からの位置と反応時刻を図 3-27，図 3-28 に示す．ここで反応時刻とは，点火・発煙開始後の各センサ計測値が大きく変化し始めた時刻とする（発生した煙やガスはトンネル内風速 2m/s によって下流へ押し流されるため小さな反応でも初期状態より変化が継続的に生じ始めた時刻とした）．

図 3-27 は Case1-1 の結果で，Cs 濃度計は投光部と受光部間に煙が到達した際に反応し始めるが，煙は 2m/s の縦流風があっても熱気流により 10m 地点のトンネル頂部まで達している．火災検知器（表 2-3 参照）は火源の炎に反応して，点火から 28 秒後に火災として検知しているが，各センサとも火災検知器と同等以上の反応を示しており，より早期に火災検知できる可能性が確認できた．

SS はトンネル壁面に設置したため，横断方向への煙の広がりやセンサの反応時間遅れが含まれており，トンネル頂部の Cs 濃度計と比べると反応は遅かった．

LGS は高い設置箇所が有効であり，Cs 濃度計とほぼ同時に反応を開始しており，燃焼により発生した煙と共に広がっている有害ガスを検出している．

PDS は 40m，70m 地点で非常に早く反応しているが，これは火源の炎の光に反応しているためである．PDS は煙がセンサ周辺に到達するだけでなく，炎が発生している場合，受光量の増加を捉えて電圧比が上昇するため，より早く火災を検知できる可能性があることが確認された．また，煙が周囲に達すると PDS の受光量が減少し，電圧比が低下する．

図 3-28 は Case2-1 の結果で，火源に近い Cs 濃度計は煙がトンネル頂部に到達せず，反応していない．反応を示した計測点でも熱気流による煙の浮力が弱いため，Case1-1 よりもトンネル頂部への煙到達は遅かった．火災検知器は当然ながら発煙筒の煙は検出できなかった．

SS は Case1-1 と同様のタイミングで反応しており，トンネル横断方向への煙の広がりやくすぶりの状況でも同様に時間遅れが生じていた．

PDS は Cs 濃度計と同じ位置に設置しているが，より早く反応している．これは PDS の俯瞰範囲に煙が進入することにより周囲受光量が変化すると PDS の電圧比が上昇または低下する反応を示し，より早く火災検知できる可能性があることが確認された．今回の実験の Case2-1 において PDS は受光量の増加を捉え，電圧比が上昇する反応を示した．

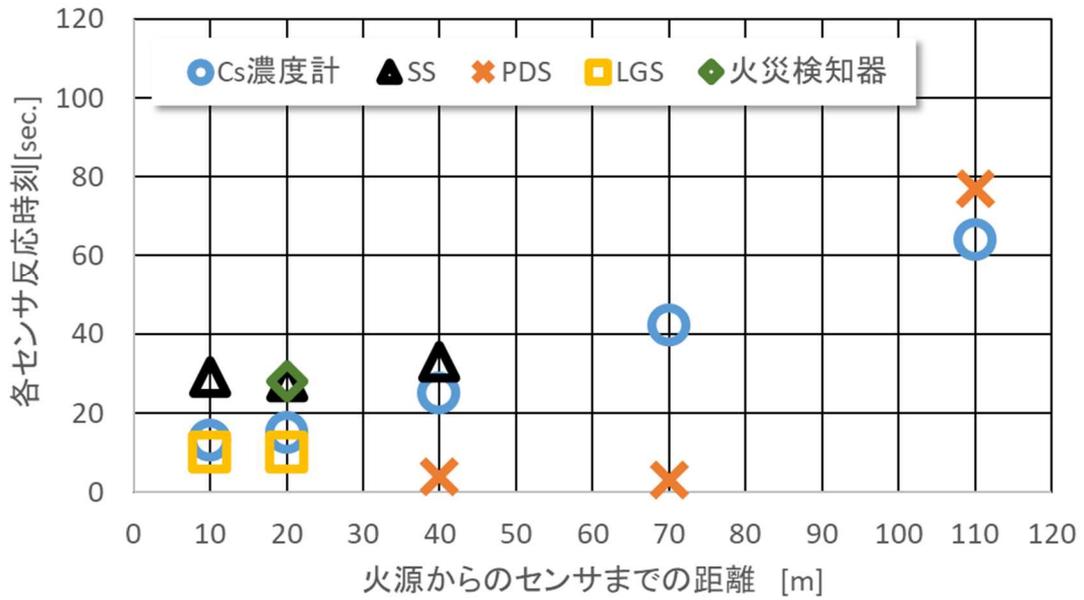


図 3-27 センサ位置と反応時刻 (Case1-1)

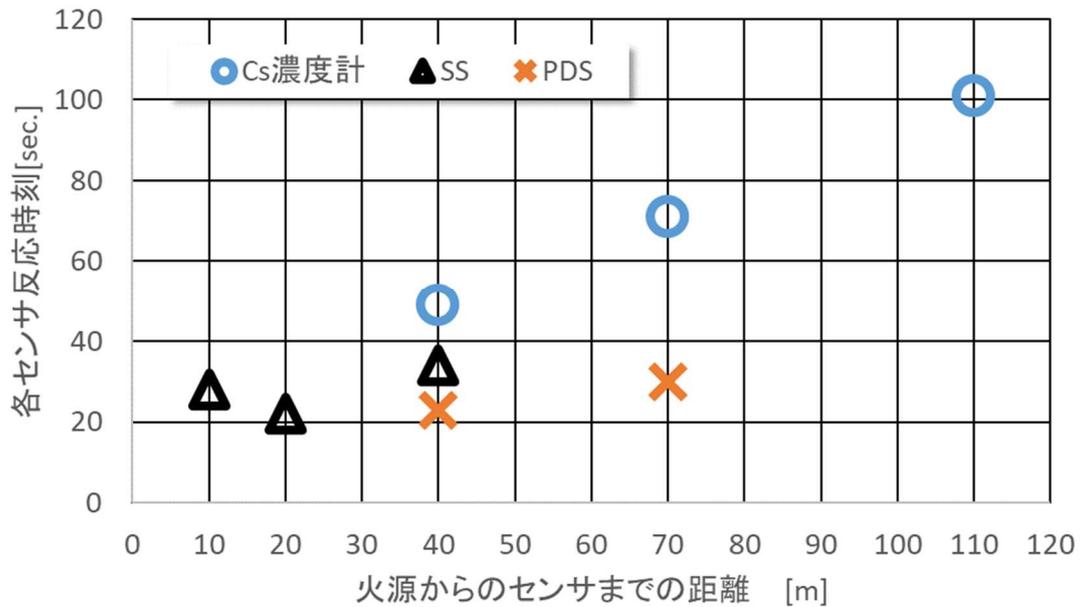


図 3-28 センサ位置と反応時刻 (Case2-1)

Case1-2（くすぶり無し，風速 0m/s）及び Case2-2（くすぶり有り，風速 0m/s）両ケースの各センサの火源からの位置と反応時刻を図 3-29，図 3-30 に示す．ここで反応時刻とは，点火・発煙開始後の各センサ計測値が大きく変化し始めた時刻とする（LGS の横断方向設置（L-3）は，小さな反応でも初期状態より変化が継続的に生じ始めた時刻とした）．

図 3-29 は Case1-2 の結果で，Cs 濃度計は投光部と受光部間に煙が到達した際に反応し始めるが，煙は火源の燃焼による熱気流によりほぼ垂直に上昇し，10m 地点のトンネル頂部まで達している．火災検知器（表 2-3 参照）は火源の炎に反応して，点火から 30 秒後に火災として検知しているが，各センサとも火災検知器と同等以上の反応を示しており，より早期に火災検知できる可能性が確認できた．

PDS は 40m，70m 地点で非常に早く反応しているが，Case1-1（くすぶり無し，風速 2m/s）と同様に火源の炎の光に反応しているためである．風速が無く煙の拡がりはややかであるにも関わらず Case1-1 と同時刻に反応を開始していることから火源の光を捉えていることが分かる．このことから炎が発出する火災では火災検知器よりも早く火災を検知できる可能性がある．

図 3-30 は Case2-2 の結果で，発煙筒の弱い熱気流で煙がトンネル頂部に上昇するため，火源に近い Cs 濃度計も反応している．各計測位置の Cs 濃度計は反応を示したが，Case1-2（くすぶり無し，風速 0m/s）及び Case2-1（くすぶり有り，風速 2m/s）よりも煙到達は遅かった．火災検知器は当然ながら発煙筒の煙は検出できなかった．

PDS は Cs 濃度計と同じ位置に設置しており，ほぼ同時に反応している．これはトンネル内風速が 0m/s のため，煙や有害ガスは熱気流によりトンネル頂部に上昇し頂部に沿って縦断方向に拡がっていくため，PDS の俯瞰範囲に煙が進入しにくく，煙が到達して Cs 濃度計とほぼ同時の反応となったと考えられる．センサ周辺に煙が到達すると PDS の電圧比が上昇または低下する反応を示し，炎が発出しない火災の状況をより早く検知できる可能性があることが確認された．

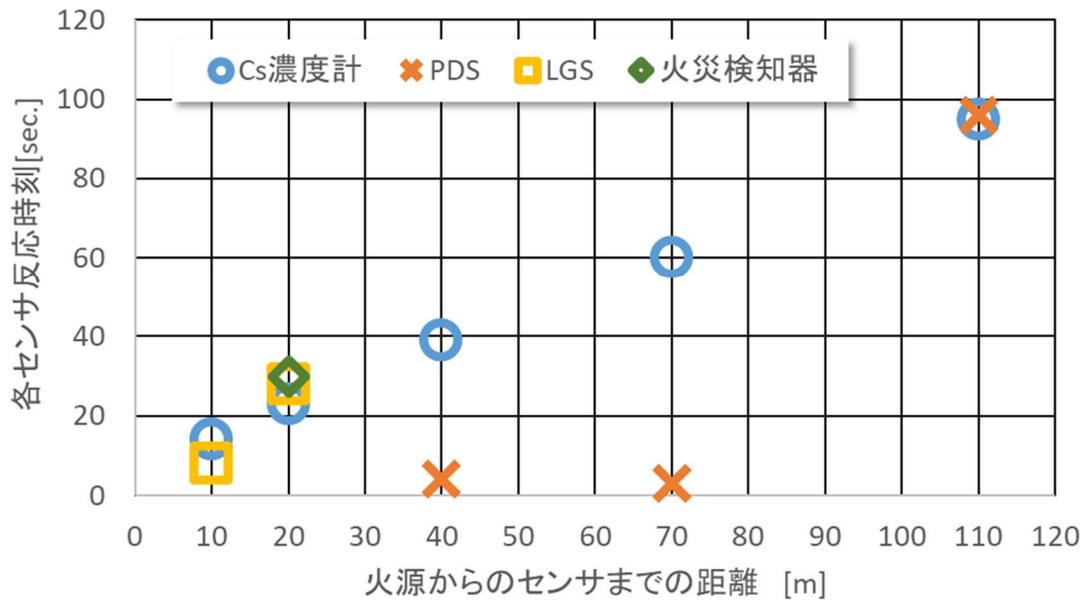


図 3-29 センサ位置と反応時刻 (Case1-2)

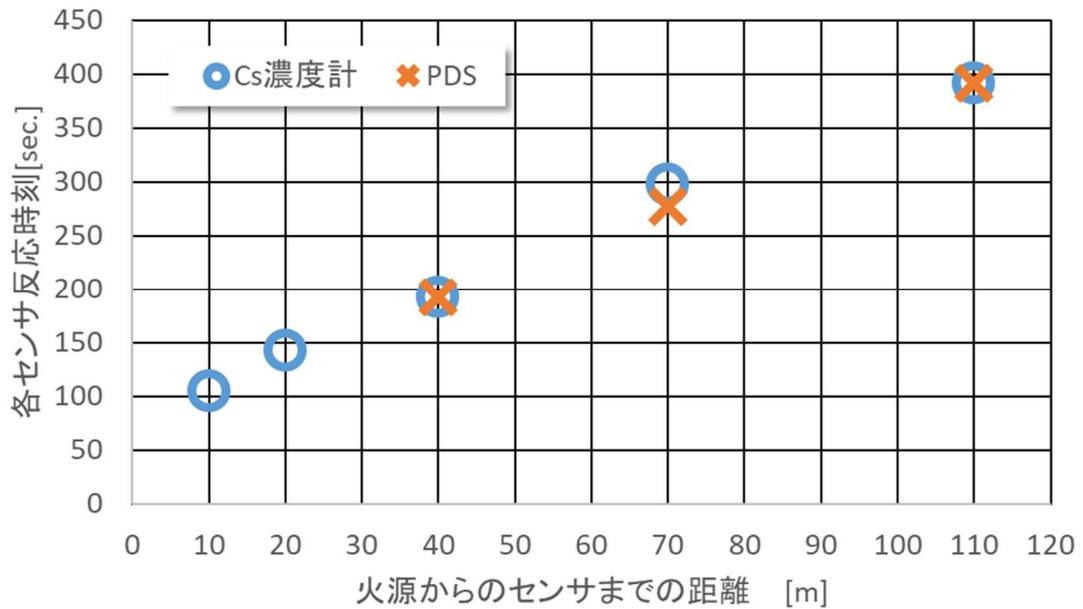


図 3-30 センサ位置と反応時刻 (Case2-2)

実大トンネル A における実験の各センサ反応時刻を表 3-3 に示す。Case1-1（くすぶり期なし，風速 2m/s）実験では，40m および 70m 地点の PDS が発火から 3～4 秒後に火源の光を捉えて電圧比が上昇し始め，上段および横断方向に設置した LGS が発火 10 秒で反応し，次に 10m 地点の基準 Cs 濃度計が 13 秒経過時に反応し，20m 地点の火災検知器は 28 秒経過時に火災と検知，10m 地点側壁に設置した SS は 29 秒経過時に反応した。PDS は火源から 70m と離れた位置にも関わらず，発火の 3 秒後に電圧比が上昇し始め，20 秒経過時には発火前の 1.2 倍の電圧比にまで上昇し，その後は減少し，煙が到達してからは 0.8 倍にまで低下した。これは，最初火源の炎から発する光を捉え，火勢の拡大に合わせて反応も増大し，20 秒経過時から火源と PDS の間の煙によって火源からの光量が減少し，PDS が煙に覆われるとさらに受光光量が減少し，電圧比が 1.0 を下回ったためと考えられる。

Case2-1（くすぶり期あり，風速 2m/s）実験では，20m 地点側壁に設置した SS が発煙開始後 22 秒で反応し，40m 地点に設置した PDS が 23 秒で煙到達前に受光光量の変化を捉え反応し，次に 10m 地点側壁に設置した SS が 28 秒経過時に反応，70m 地点の PDS が 30 秒経過時に反応した。40m 地点の Cs 濃度計は 49 秒経過時に反応している。

Case1-2（くすぶり期なし，風速 0m/s）実験では，40m および 70m 地点の PDS が発火から 3～4 秒後に火源の光を捉えて電圧比が上昇し始め，上段および横断方向に設置した LGS が発火 10 秒で反応し，次に 10m 地点の基準 Cs 濃度計が 13 秒経過時に反応し，20m 地点の火災検知器は 28 秒経過時に火災と検知，10m 地点側壁に設置した SS は 29 秒経過時に反応した。PDS は火源から 70m と離れた位置にも関わらず，発火の 3 秒後に電圧比が上昇し始め，20 秒経過時には発火前の 1.2 倍の電圧比にまで上昇し，その後は減少し，煙が到達してからは 0.8 倍にまで低下した。これは，最初火源の炎から発する光を捉え，火勢の拡大に合わせて反応も増大し，20 秒経過時から火源と PDS の間の煙によって火源からの光量が減少し，PDS が煙に覆われるとさらに受光光量が減少し，電圧比が 1.0 を下回ったためと考えられる。

Case2-2（くすぶり期あり，風速 0m/s）実験では，20m 地点側壁に設置した SS が発煙開始後 22 秒で反応し，40m 地点に設置した PDS が 23 秒で煙到達前に受光光量の変化を捉え反応し，次に 10m 地点側壁に設置した SS が 28 秒経過時に反応，70m 地点の PDS が 30 秒経過時に反応した。40m 地点の Cs 濃度計は 49 秒経過時に反応している。

表 3-3 実大トンネル A 実験のセンサ反応時刻まとめ

火源・発煙源からの距離	10m			20m				40m			70m		110m	
	Cs	SS	LGS	Cs	SS	LGS	FD	Cs	SS	PDS	Cs	PDS	Cs	PDS
Case1-1 くすぶり期無し 風速 2m/s	13s	29s	10s	15s	28s	10s	28s	25s	33s	4s	42s	3s	64s	77s
Case1-2 くすぶり期無し 風速 0m/s	14s	N/R	8s	23s	N/R	28s	30s	39s	N/R	4s	60s	3s	95s	96s
Case2-1 くすぶり期有り 風速 2m/s	N/R	28s	N/R	N/R	22s	N/R	N/R	49s	34s	23s	71s	30s	101s	N/R
Case2-2 くすぶり期有り 風速 0m/s	105s	N/R	N/R	143s	N/R	N/R	N/R	193s	N/R	193s	298s	277s	391s	391s

FD：火災検知器 N/R：反応なし

### 3.6 考察

第3章では実物大のトンネルを使用して、炎が発出する火災を想定した n-ヘプタンを燃焼するケースと炎発出前のくすぶり期を想定した発煙筒による煙のみのケースを設定し、各センサの検出特性を確認する火災実験を行った。

SS は有風のケースで煙がセンサ付近に到達すると煙を検出することを確認した。同一断面内で Cs 濃度計はトンネル頂部に設置、SS はトンネル壁面の照明器具付近に接したため、煙の到達時刻に時間遅れがあるものの、20 秒程度以内の遅れで検出した。また、炎が発出する場合、炎検出型の火災検知器と同等に反応することが確認できた。これにより SS は、炎が発出する火災ならびにくすぶり期の火災時に一定以上の風速があれば煙をセンサ内に取り込み、火災を検知できる可能性があることが確認できた。

LGS は炎を発出するケースで、計測方向を横断方向に設置した LGS と縦断方向の高さ 4.5m に設置した LGS は Cs 濃度計への煙到達とほぼ同時に反応した。また、火災検知器と同等に反応することを確認した。発煙筒を使用したくすぶり期を想定したケースでは、発煙筒から発出される煙にほとんど CO<sub>2</sub> が含まれないため LGS は反応しなかった。しかし、第2章の予備実験で計測範囲内に煙が到達し、CO<sub>2</sub> が含まれていれば検出しているため、炎が発出する火災ならびにくすぶり期の火災時ともに、CO<sub>2</sub> を検出することで火災を検知できる可能性があることが確認できた。

PDS は炎が発出するケースで、火源から 70m 付近までは煙が到達する前に火源の炎の明るさを捉え反応した。また、炎検出型の火災検知器と比較して非常に早期に反応している。くすぶり期を想定したケースでもセンサ付近に煙が到達する前に煙の影響による周辺光量の変化が現れ、早期に検出した。しかし、当初は煙の到達などにより PDS の受光光量は減少すると想定したが、上昇するケースが存在した、これは煙色の濃淡による影響があると想定し、第4章で更なる PDS の検出特性を確認することとした。これらより PDS は煙が到達する前から反応することから、より早期に火災を検知できる可能性が確認された。

## 4. 実大トンネル B における PDS の煙色による検出特性実験

### 4.1 実験の概要

前章で PDS は煙の反射光による周辺光量の変化を捉えることが分かり、煙色により反射光の強度が異なることが想定されるため、くすぶり期を対象として異なる煙色による PDS の検出特性の検証実験を行った。実験は福井県の県道 25 号福井今立線の旧道、現在は使用されていない旧戸口トンネル（馬蹄形）で実施した。

## 4.2 実験装置の概要

実大トンネル B は図 4-1 に示すとおり、延長 488m、勾配は左から+1.0% (329m)、-0.46% (159m)、断面積は約 31m<sup>2</sup>である。トンネル内の実験区間は 200m を防煙幕で区切り無風状態として図 4-2 に示すとおり区間内の 80m をセンサ設置区間とし、照明は両側壁に白色 LED 器具を 3m 間隔(千鳥配列)で設置した。センサは PDS と K 型熱電対(素線径 0.32mm, 温度許容差±1.5°C) 5 点を設置したツリーを 10m 間隔で 9 箇所設置した。さらに Point2, 5, 8 のツリーには天井部の PDS 近傍に Cs 濃度計を設置した。発煙源は白色煙として汎用スモークマシン、黒色煙として黒色発煙筒を使用し、くすぶり期を模した小規模な対流を発生させるため、発熱源にポータブル石油ストーブ(以下「ストーブ」という)を使用した。発煙源および発熱源は point5 と point6 の中間点に配置した。図 4-3 に汎用スモークマシンの外観、図 4-4 に黒色発煙筒の外観、図 4-5 にストーブの外観を示す。また表 4-1 に実験に使用した発煙源・発熱源の仕様を示す。

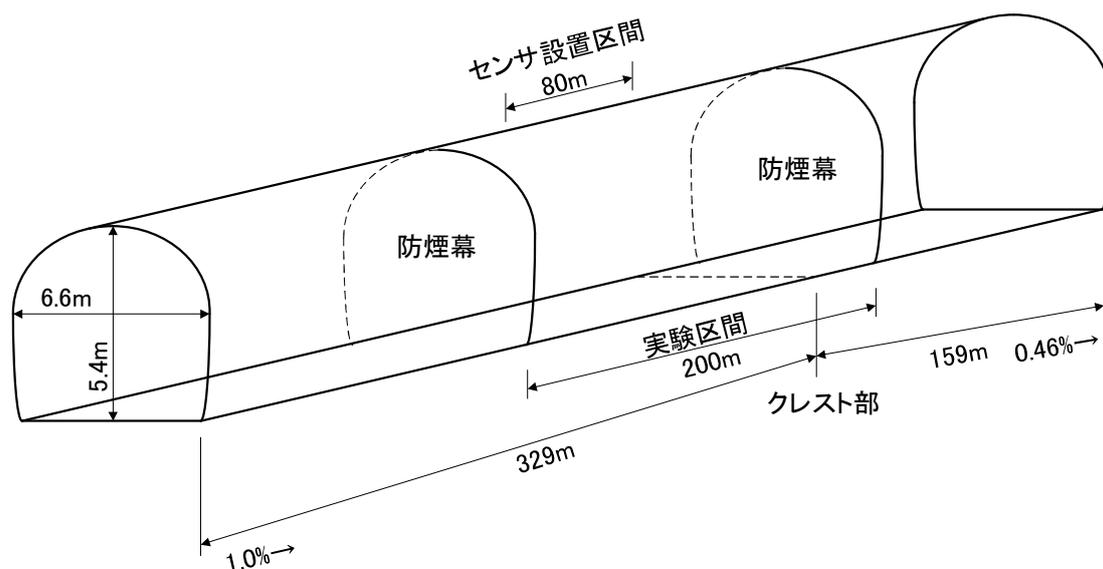


図 4-1 実大トンネル B 概要図

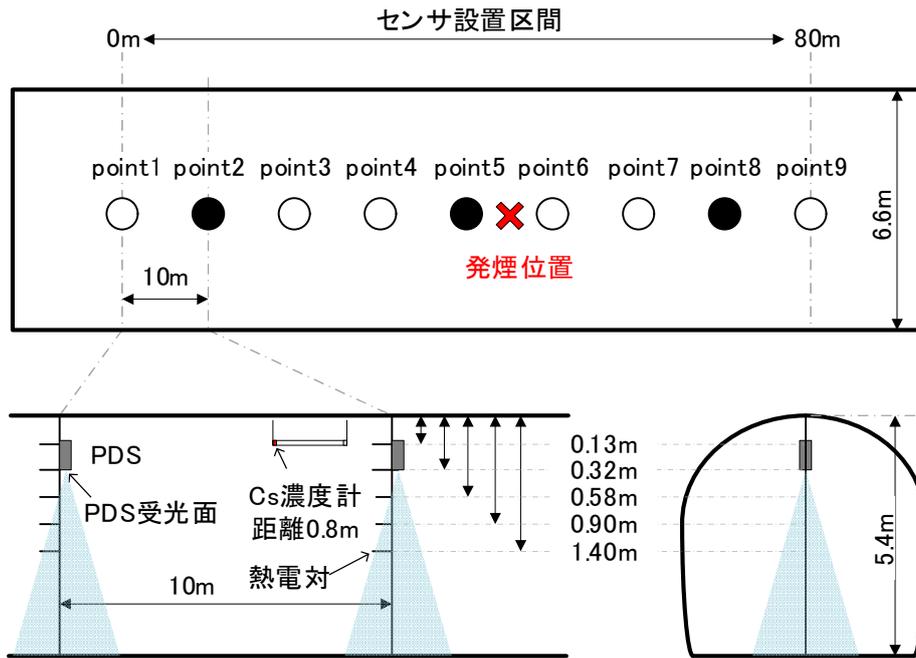


図 4-2 トンネル内センサ配置図（青色は PDS 俯瞰イメージ）



図 4-3 汎用スモークマシンの外観<sup>37)</sup>



図 4-4 黒色発煙筒の外観<sup>38)</sup>



図 4-5 ストープの外観<sup>39)</sup>

表 4-1 発煙源・発熱源の仕様

機材	用途	発生手法	仕様等
スモークマシン	白色煙発生	グリコール類と精製水混合水溶液をセラミックヒータにより加熱し白色煙を発生	ダイニチ工業社製スモークマシン ポータースモーク PS-2005 発煙能力：10～31m <sup>3</sup> /分 長さ 296×高さ 213×幅 172mm 質量 5.0kg
発煙筒	黒色煙発生	脂肪族鎖式飽和炭化水素を燃焼させ黒色煙を発生	細谷火工社製発煙筒モーク（黒色煙） 発煙時間 90 秒 全長 約 170mm, 外径 55mm 質量 260g
ストーブ	熱気流発生	灯油を芯に浸み込ませ気化ガスを燃焼させて燃焼熱を発生	コロナ社製ポータブル石油ストーブ SL-66H 発熱量：6.59kW 高さ 598×幅 460×奥行 460mm 重量 12.2kg

### 4.3 実験ケースの設定

実験は、表 4-2 に示すように白色煙と黒色煙の 2 ケースとし、煙の到達に伴う PDS 電圧比の変化と Cs 濃度の変化を比較し、併せて PDS による煙の検出特性と熱電対による熱気流の検出特性を比較した。

図 4-6 にスモークマシンから排出される白色煙がストーブから立ち上る熱気流により上昇する様子を示す (Case1)。

表 4-2 実験ケース

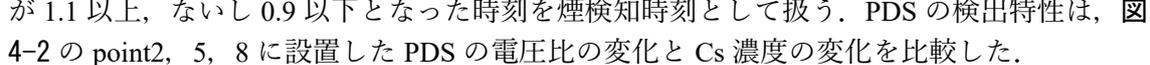
Case	風速	発煙源	発煙時間	発熱源	検証するセンサ
1 白色煙	0m/s	スモークマシン	180 秒	ストーブ	PDS
2 黒色煙	0m/s	発煙筒	90 秒	ストーブ	PDS

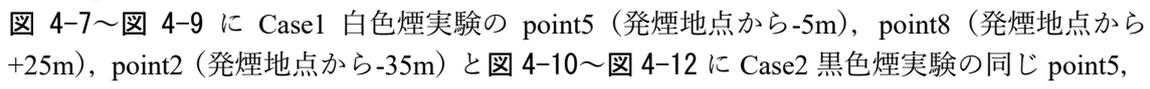
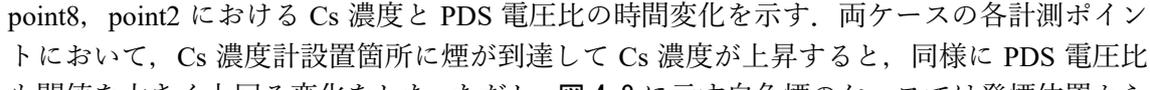
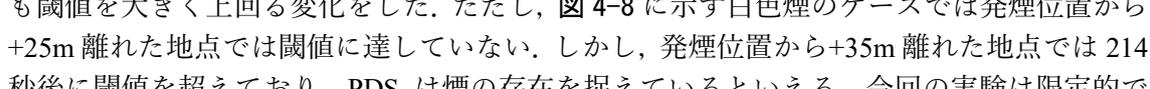
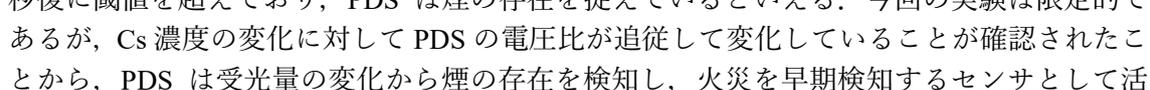
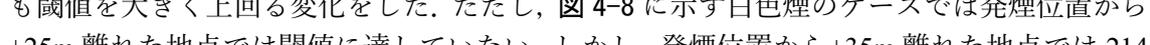


図 4-6 実験状況写真 (白色煙 120 秒後)

## 4.4 実験結果

### 4.4.1 PDSの煙検知状況

本実験では煙の到達を判断する閾値として、Cs濃度計ではCs濃度が0.1[1/m]以上となる時刻とした。一方、PDSは煙に対して受光量が増加または減少する両特性を考慮し、電圧比が1.1以上、ないし0.9以下となった時刻を煙検知時刻として扱う。PDSの検出特性は、 4-2のpoint2, 5, 8に設置したPDSの電圧比の変化とCs濃度の変化を比較した。

 4-7～ 4-9にCase1 白色煙実験のpoint5（発煙地点から-5m）、point8（発煙地点から+25m）、point2（発煙地点から-35m）と 4-10～ 4-12にCase2 黒色煙実験の同じpoint5, point8, point2におけるCs濃度とPDS電圧比の時間変化を示す。両ケースの各計測ポイントにおいて、Cs濃度計設置箇所に煙が到達してCs濃度が上昇すると、同様にPDS電圧比も閾値を大きく上回る変化をした。ただし、 4-8に示す白色煙のケースでは発煙位置から+25m離れた地点では閾値に達していない。しかし、発煙位置から+35m離れた地点では214秒後に閾値を超えており、PDSは煙の存在を捉えているといえる。今回の実験は限定的であるが、Cs濃度の変化に対してPDSの電圧比が追従して変化していることが確認されたことから、PDSは受光量の変化から煙の存在を検知し、火災を早期検知するセンサとして活用できる可能性を確認した。

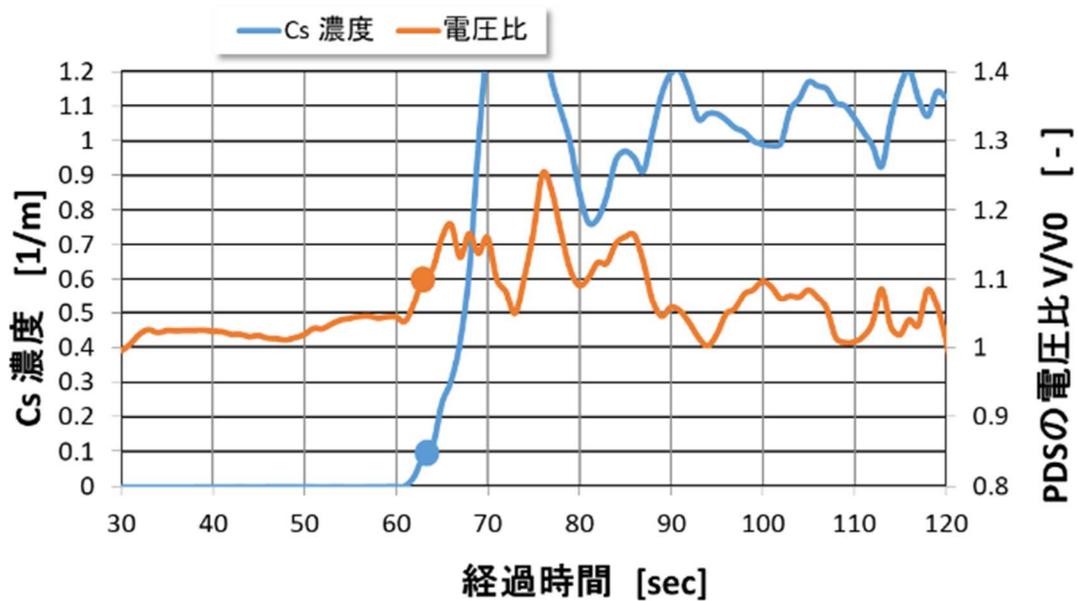


図 4-7 Cs 濃度と PDS の電圧比の変化  
 (白色煙 point5 発煙位置から-5m)

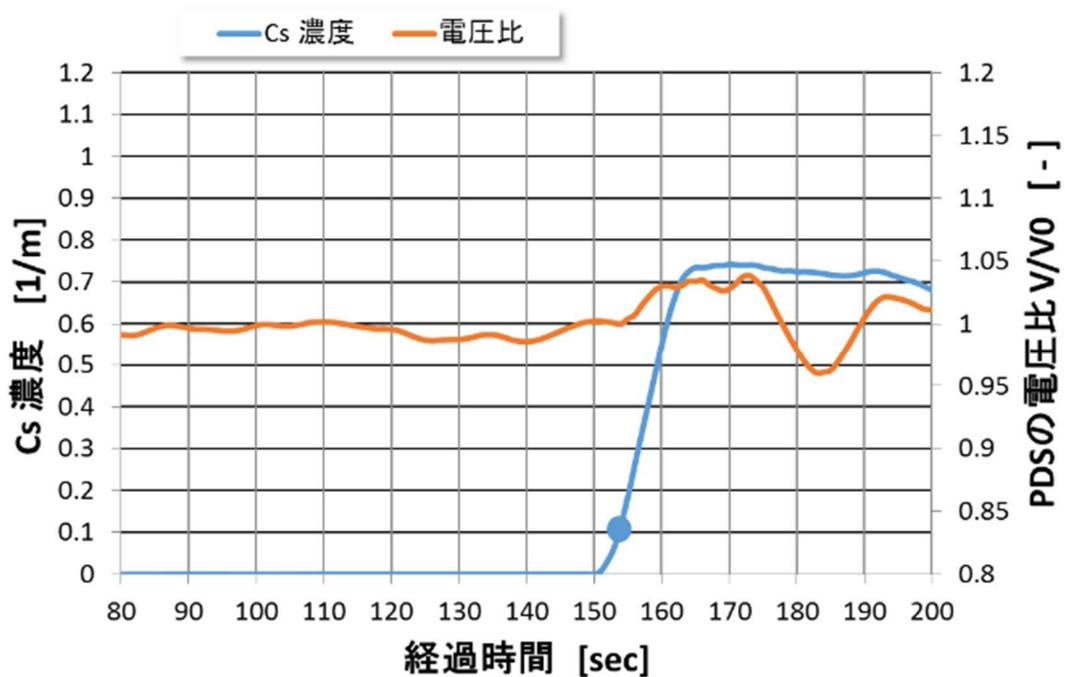


図 4-8 Cs 濃度と PDS の電圧比の変化  
 (白色煙 point8 発煙位置から+25m)

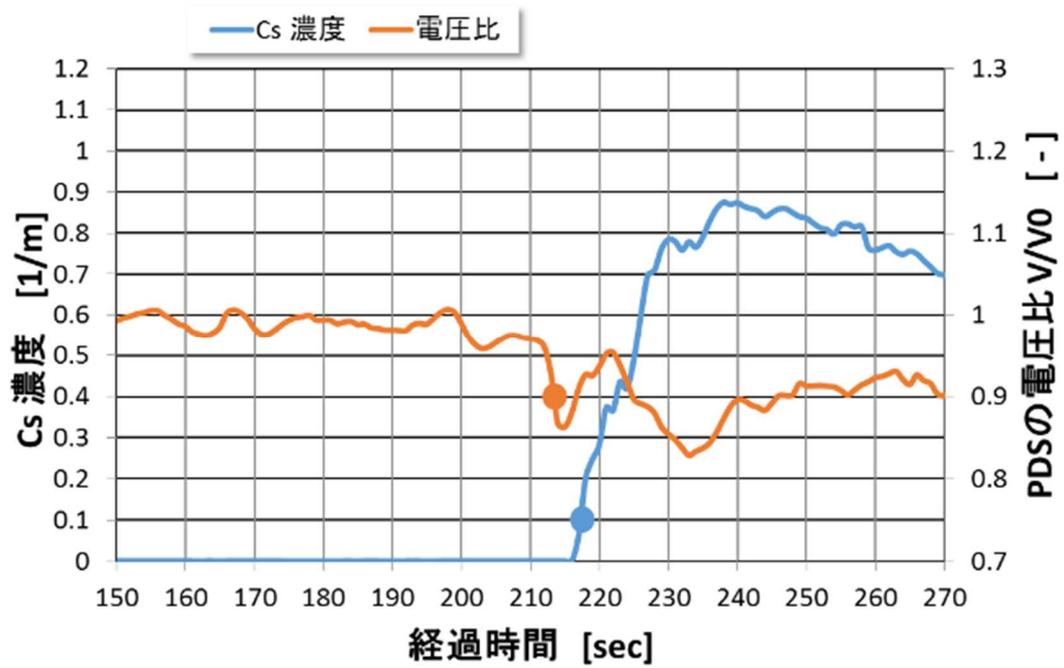


図 4-9 Cs 濃度と PDS の電圧比の変化  
 (白色煙 point2 発煙位置から-35m)

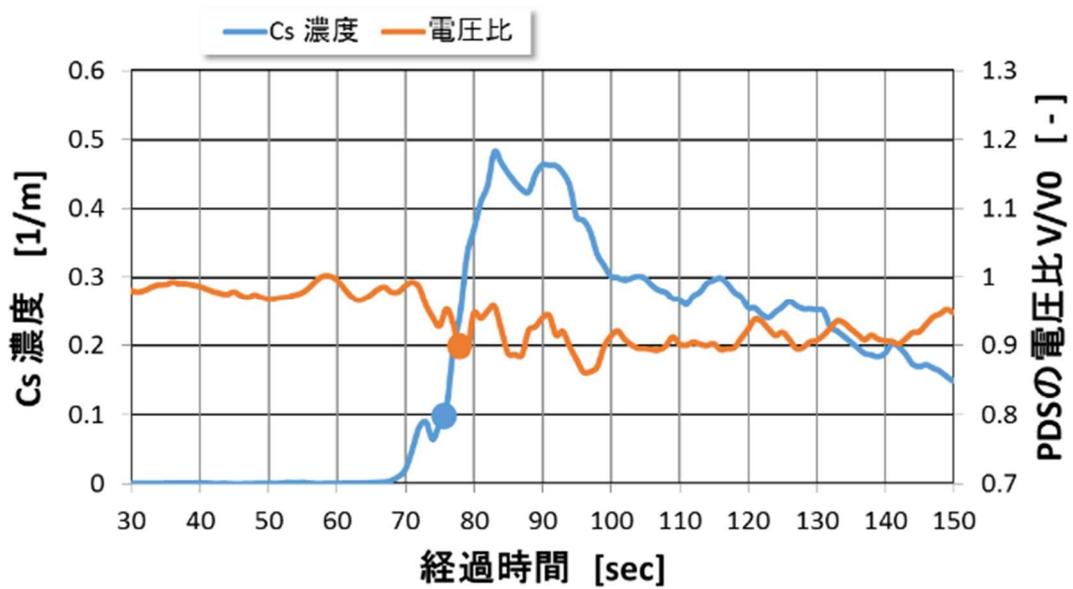


図 4-10 Cs 濃度と PDS の電圧比の変化  
 (黒色煙 point5 発煙位置から-5m)

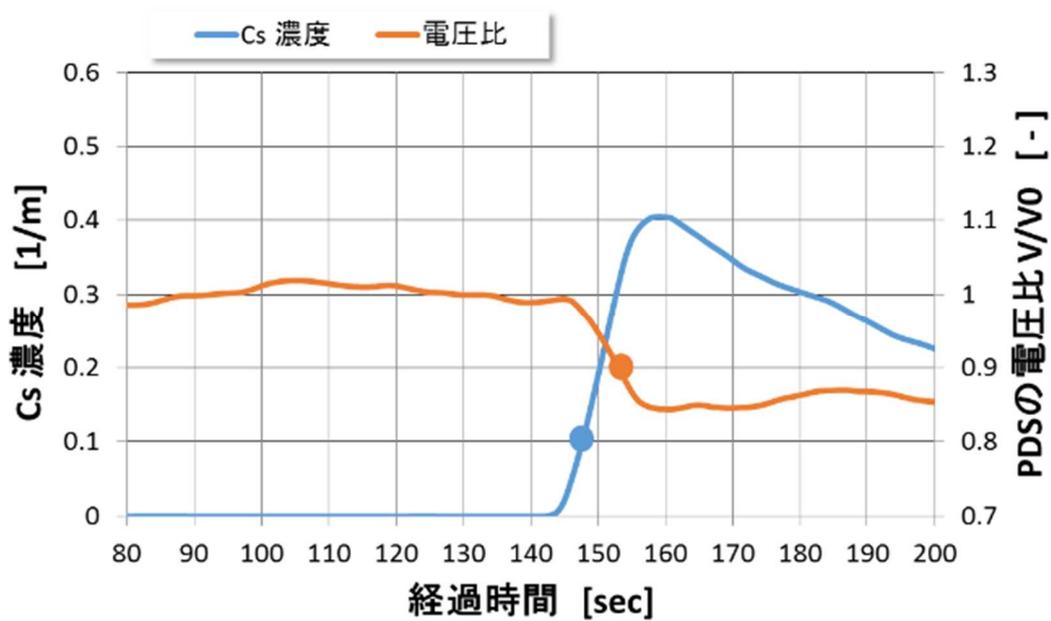


図 4-11 Cs 濃度と PDS の電圧比の変化  
 (黒色煙 point8 発煙位置から+25m)

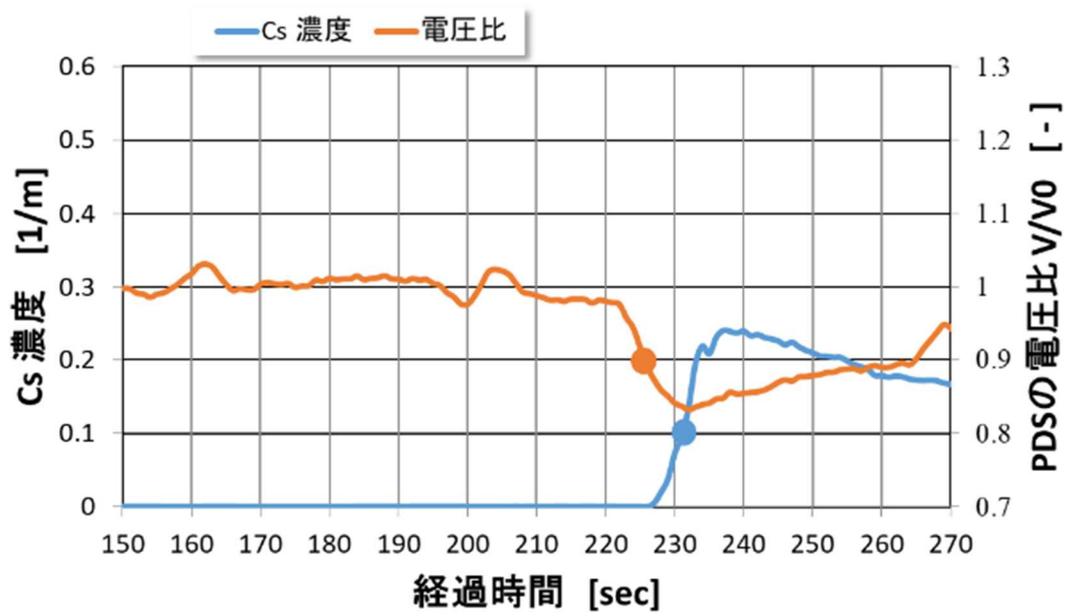


図 4-12 Cs 濃度と PDS の電圧比の変化  
 (黒色煙 point2 発煙位置から-35m)

#### 4.4.2 煙色による PDS 受光量への影響

照明光と煙色について着目すると、黒色煙のケースでは図 4-10～図 4-12 に示すとおり point2, 5, 8 とも PDS 付近に煙が到達すると黒色煙の粒子により俯瞰しているエリアの照明光が遮られ PDS 電圧比が低下した。一方、白色煙のケースでは、図 4-7, 図 4-8 に示す point5, 8 では PDS 付近に煙が到達すると電圧比は上昇した。この現象は照明光源の光が白色煙の粒子に反射して光幕現象が発生し PDS の受光量が増加したためである。しかし、図 4-9 に示すとおり point2 では黒色煙のケースと同様に電圧比が低下している。この要因は、トンネル頂部を縦断方向に流動していく煙が PDS を包み込み、光幕反射現象よりも煙粒子による減光が主体的であったためであると考えられる。このように、煙色により PDS 電圧比は真逆の挙動を示すが、煙の到達を示す Cs 濃度の変化と同時に現れることから、電圧比変化の絶対値から煙の到達を判断できる事が分かった。

#### 4.4.3 煙の拡がり検知

トンネル縦断方向への煙の拡がり状況を確認するため、センサ設置位置と閾値に達した時刻との関係、併せて、トンネル最頂部熱電対の上昇温度が  $dT=0.5\text{deg}$  以上となる時刻を煙色別に図 4-13、図 4-14 に示す。なお、今回の実験では全ての K 型熱電対が許容差 ( $dT=\pm 1.5\text{deg}$ ) を超える温度変化を示さなかったため、熱気流の到達を示す温度上昇の閾値を  $dT=0.5\text{deg}$  として評価を行っている。両図から煙色に関わらず、各計測地点での  $C_s$  濃度および PDS の電圧比が閾値を超えた時刻、すなわち煙の到達は、発煙位置からトンネル縦断方向に概ね均等に拡がっていることが示されているが、プラス方向の計測地点側の方が若干早く煙が到達していることが分かる。これはトンネルの縦断勾配+1.0%が影響したものと考えられる。

図 4-13 の白色煙のケースでは、発煙源から-5m 離れた地点で  $C_s$  濃度が 0.1 に達した時刻は 64 秒、PDS の電圧比が 1.1 に達した時刻は 64 秒と同時刻であった。また、発煙源から-35m 離れた地点で  $C_s$  濃度が 0.1 に達した時刻は 218 秒、PDS の電圧比が 0.9 に達した時刻は 215 秒とほぼ同時刻であった。

図 4-14 の黒色煙のケースでは、発煙位置から-5m 離れた地点で  $C_s$  濃度が 0.1 に達した時刻は 76 秒、PDS の電圧比が 0.9 に達した時刻は 79 秒とほぼ同時刻であった。また、発煙源から-35m 離れた地点で  $C_s$  濃度が 0.1 に達した時刻は 232 秒、PDS の電圧比が 0.9 に達した時刻は 227 秒とほぼ同時刻であった。

どちらのケースもほぼ同時刻に評価基準に達していることから、煙色に関わらず PDS が煙の広がる様子を捉えることが判明した。

次に発煙位置から発生する熱気流と煙の拡がり状況を比較すると、今回設定した閾値では白煙・黒煙共に熱の拡がりよりも煙の拡がりを早く捉えている。火災初期のくすぶりを再現したストーブから発生した熱浮力による気流(熱気流)は上昇する際に周囲の空気を誘引しながら徐々に温度が減衰し、天井部に達する頃には浮力は無くなっている。一方、煙は熱気流と共に上昇した後、 $C_s$  濃度が急激に変化することなく(粒子が天井部にあまり付着せず)、縦断方向に拡散する<sup>40)</sup>。このため、初期のくすぶり火災段階では熱の拡がりよりも煙の拡がりの方が早いケースもあり、エリアを俯瞰して煙を検知する PDS は早期検知に対し有効である。

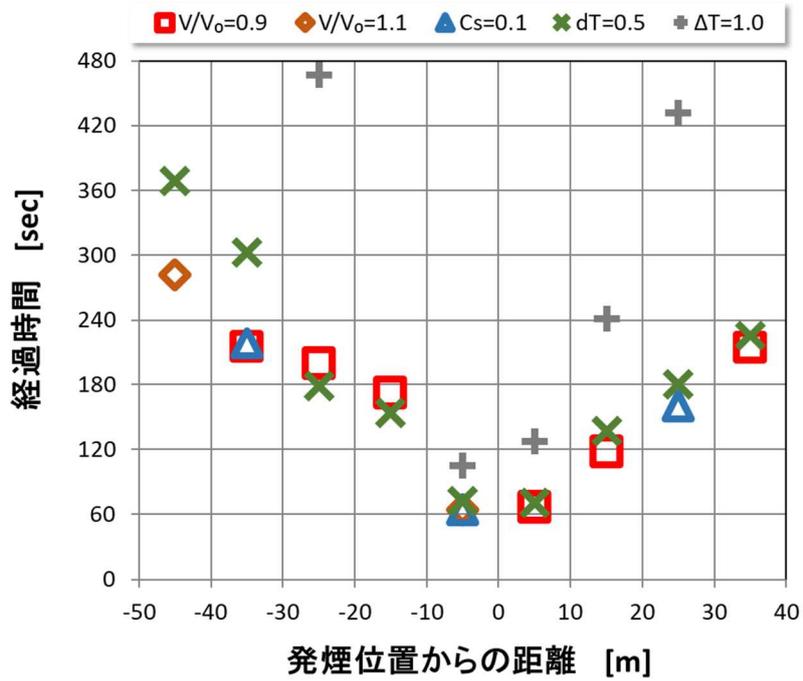


図 4-13 センサ位置と煙到達までの時刻（白色煙）

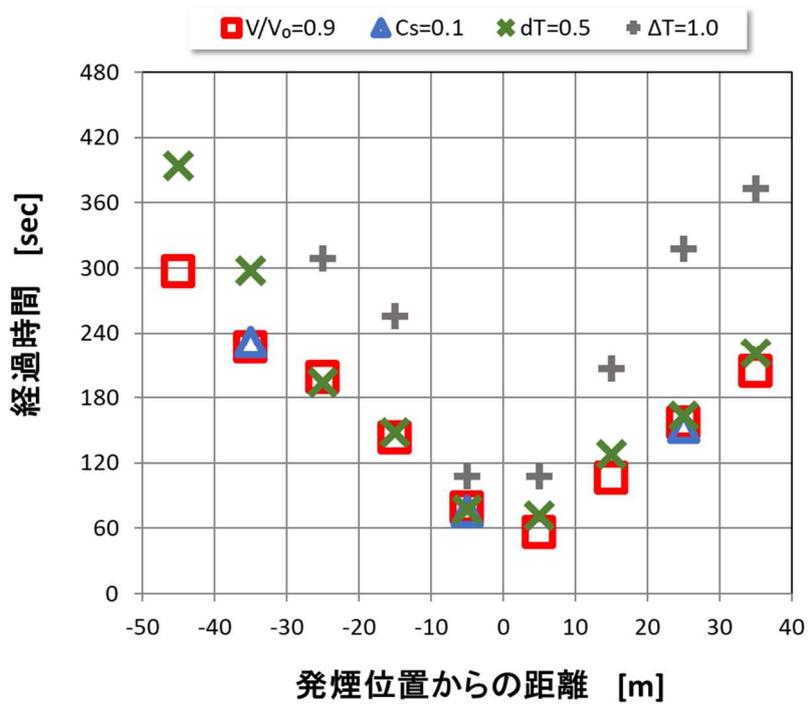


図 4-14 センサ位置と煙到達までの時刻（黒色煙）

#### 4.4.4 検知時刻まとめ

実大トンネルBでの実験の各位置の検知時刻を表4-3に示す。PDSとCs濃度計は、白色煙の+25m地点の除き5秒以内の差で検知している。なお白色煙の+25mの場合はCs濃度計と同時刻に反応し始めたものの、閾値を超えなかったためである。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秒以下であるが、-x方向では35m以上になると熱電対の方が90秒程度遅れる。これは、熱はトンネル天井や壁面に吸収され、発煙源から離れるほど温度は急激に低下するためである。煙はトンネル壁面への付着は少ないため、熱よりも煙検知の方が早期検知には有利であると言える。また、黒色煙では受光光量が減少のみであるが、白色煙では光幕反射で受光光量が増加する現象がみられた。

表4-3 実大トンネルB実験の検知時刻まとめ

発煙位置からの距離		±5m				±15m			±25m				±35m				±45m		
		PDS	TC 0.5	TC 1.0	Cs	PDS	TC 0.5	TC 1.0	PDS	TC 0.5	TC 1.0	Cs	PDS	TC 0.5	TC 1.0	Cs	PDS	TC 0.5	TC 1.0
Case1 白色煙	-方向	64s	72s	105s	64s	172s	154s	537s	199s	178s	467s	-	215s	303s	N/R	218s	282s	369s	N/R
	+方向	67s	71s	127s	-	118s	137s	241s	N/R	180s	423s	160s	214s	225s	494s	-	-	-	-
Case2 黒色煙	-方向	79s	77s	108s	76s	143s	148s	256s	199s	194s	309s	-	227s	298s	N/R	232s	297s	394s	N/R
	+方向	56s	72s	108s	-	106s	128s	207s	157s	163s	318s	153s	204s	221s	373s	-	-	-	-

TC0.5：最上部の熱電対 0.5°C上昇      TC1.0：最上部の熱電対 1.0°C上昇

Cs：Cs濃度計      N/R：反応なし      -：センサ設置無し

#### 4.5 考察

実大トンネルBの実験では、無風下で火災初期くすぶり期を模擬し、煙色によるPDSの検出特性について確認した。白色煙・黒色煙を使用した実験結果から、煙色の違いにより周囲光が煙粒子等の反射・吸収により増減してもPDS電圧比変化量の絶対値を捉えることで煙の先端部の移動に追従して検知することが可能となり、より早期の検知に有効かつ煙の拡散範囲の検出にも有効であることが分かった。また、無風状況下で火災初期の小さな熱源と少量の発煙状況下では、発熱源から発生する熱気流の拡がりよりも煙の拡がりを早く検出する場合があります。火災の早期検知にPDSは有効であることを確認した。このことによりPDSをトンネル縦断方向に等間隔で設置することで煙の拡がりを把握できる可能性があることを確認した。

## 5. 結論

トンネル火災の早期検知を目的として、発火前の火災初期段階の煙や有害ガスを検知しうるセンサを選定して、予備実験として模型トンネルで定性的なセンサ出力特性を確認した後、実大トンネル A において有風下での発火と発煙のみ実験を実施して各センサ検出特性を確認、更に実大トンネル B において無風条件のもと、煙色の違いによる PDS の検出特性を検証した。これらの実験結果から各センサの検出特性と火災早期検知について以下の知見を得た。本研究では、センサごとに結論を記載することとした。これは、各章の実験により得られた知見から各センサの特徴と検出特性を記載することにより、各センサの有効性がまとめられるためである。

### (1) 実大トンネル A での SS 検出特性

発火させた Case1-1 (くすぶり期無し、トンネル内風速 2m/s) 実験では標準の火災検知器 (炎検知式) とほぼ同時に反応したが、トンネル横断方向への煙到達時間遅れから、計測延長の長い LGS やトンネル頂部に設置した PDS よりも反応が遅れている。また、発煙のみの Case2-1 (くすぶり期有り、トンネル内風速 2m/s) 実験でも、PDS よりも反応が遅れている。しかし、反応時刻に違いは見られるものの、センサ内に煙が取込まれれば確実に煙の到達を捉えることができる。

### (2) 実大トンネル A での LGS 検出特性

Case1-1 (くすぶり期無し、トンネル内風速 2m/s) 及び Case1-2 (くすぶり期無し、トンネル内風速 0m/s) 実験では、火源炎の明るさを捉えた PDS より CO<sub>2</sub> の検出の反応が遅れたが、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ことから、投受光部間に CO<sub>2</sub> が到達すれば確実に検知できる。また、CO<sub>2</sub> は火源が発する熱浮力と縦流風速で押し流されながら上昇するため、センサ設置位置はトンネル上部エリアとして、縦断方向に設置することで検知性能と維持管理性が両立できる可能性がある。

### (3) 実大トンネル A, B での PDS 検出特性

実大トンネル A の Case1-1 (くすぶり期無し、トンネル内風速 2m/s) 及び Case1-2 (くすぶり期無し、トンネル内風速 0m/s) 実験では、火源から 70m 離れた地点で、点火から数秒後に火源の炎を捉え、電圧比が上昇した。その後、燃焼煙の到達に伴い受光量が低下して電圧比が低下した。一方、Case2-1 (くすぶり期有り、トンネル内風速 2m/s) では、発煙筒の煙が PDS を設置したトンネル頂部に達する前に照明光が煙に光幕反射して電圧比が上昇した。また、Case2-2 (くすぶり期有り、トンネル内風速 0m/s) では、PDS 付近に煙が到達すると同時に電圧比が上昇した。このように、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、更に実大トンネル B で、煙色 (黒色と白色) による検出特性確認のための実験を行った結果、黒色煙では電圧比は減少、白色煙では電圧比は増加し、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測ることで煙の到達を早期検知できることを確認した。SS や LGS はセンサ内や投受光部間に煙が達しなければ検知できないが、PDS はセンサ近辺に煙が到達していなくても、受光する周辺光量の変化を捉えることから火災の早期検知に有効であるといえる。

#### (4) 今後の展望

実大トンネル内での火災実験を行い、選定したセンサが炎発出前の煙・有害ガス・周辺光量の変化を捉えて、火災の早期検知の実現可能性を確認した。特に PDS は受光する周辺光量の変化を捉え火災の早期検知に有効であることを確認した。実際のトンネルへの適用に向け、今後実施が必要である事項は下記のとおりである。

- ・トンネル内を車両が通常走行している状態でのセンサの反応状況の確認
- ・通常時と火災時のセンサ反応の相違を確認
- ・火災検知のための閾値の決定
- ・維持管理性も考慮した設置位置・設置間隔を提案

## 参考文献

- 1) 斉藤文春：有機物質の発煙性，燃料協会誌，第49巻，第517号，pp.222-233. 1970.
- 2) 総務省消防庁，令和元年版，「消防白書」.
- 3) 東野翼，沢田史子，大藪多可志，竹井義法，南戸秀仁，都甲潔：ガスセンサによる焼火災検知，電気学会論文誌E，127巻，7号，pp.353-358，2007.
- 4) 野田和俊，高橋保盛，木山保，羽田博憲：坑内火災用新型検知器の開発，資源・素材学会誌，105，No.11，pp.818-820，1989.
- 5) 倉橋徹，今村敏明，渡辺伊作，土屋忠一：坑内火災早期発見用CO検知器の開発，日本鉱業学会誌，104，1208，pp.691-692，1988.
- 6) 大藪崇，宮原靖充，黒川不二雄，松尾博文，山浦剛俊，開登喜夫：火災検知のためのマルチカメラ方式高速動画像処理システムについて，映像情報メディア学会年次大会，pp.179-180，1997.
- 7) 谷崎徹也，上田浩次，若井昌彦：画像処理を用いたトンネル内の火災検出，電気学会論文誌，20巻，11号，pp.1313-1320，2000.
- 8) Wang, W., Ding, G., Lim, C.S., and Liu, Z.: An Integrated Safety/Security Video Image Detection (VID) System for Road Tunnel Protection, 4th International Symposium on Tunnel Safety and Security, pp.593-596,2010.
- 9) Azuma, T., Gunki, S., Ichikawa, A., and Yokota, M.: Effectiveness of a Flame-Sensing-Type Fire Detection in a Large Tunnel, 6th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnel, 2004.
- 10) 石樽大輔，竹井義法，山ノ口崇，南戸秀仁，笠原浩，大藪多可志：ガスセンサアレイを用いた早期火災検知，電子情報通信学会技術研究報告，105（261），pp.35-38，2005.
- 11) 潮木知良，川崎たまみ，京谷隆，赤木雅陽：におい物質を利用した変電所における電気火災検知の基礎検討，鉄道総研報告，vol.27，No.3，pp.27-32，2013.
- 12) 高崎大助，澤山勲：光ファイバ分布型温度センサによるベルト坑道火災監視システムの開発，資源・素材学会誌，106，No.11，pp.667-669，1990.
- 13) 国土交通省関東地方整備局ホームページ：海外の主要都市における環状の整備状況，[https://www.ktr.mlit.go.jp/road/shihon/road\\_shihon00000130html](https://www.ktr.mlit.go.jp/road/shihon/road_shihon00000130html)
- 14) 国土交通省関東地方整備局ホームページ：3環状の開通状況，[https://www.ktr.mlit.go.jp/road/shihon/road\\_shihon00000115html](https://www.ktr.mlit.go.jp/road/shihon/road_shihon00000115html)
- 15) Second Fujita Lecture, ISSMGE, TC204, IS-Sao Paulo 2017, 4th, April, 2017.
- 16) Internal document on the construction of the Tokyo Outer Ring Road under construction.
- 17) 日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説，まえがき，2019.
- 18) 日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説，pp.9-15，2019.
- 19) 日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説，pp.16-24，2019.
- 20) 山崎哲也，横田昌弘，川端信義：高速道路トンネルの潜在的火災リスク評価手法の提案，土木学会論文集F2（地下空間研究），Vol.71，No.1，31-46，2015.
- 21) Liu, Z.G., Kashef, A., Lougheed, G.D., Su, J.Z., Benichou, N. and Almand, K.H.: An Overview of the International Road Tunnel Fire Detection Research Project, 10th Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orland, FL., U.S.A., 2006.

- 22) 日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説, pp.26-28, 2001.
- 23) 2017R01EN: Design Fire Characteristics for Road Tunnels, Technical Committee 3.3 Road tunnel operation, World Road Association, 2017.
- 24) 日本火災学会：火災便覧 第4版, 第一編第3章, 2018.
- 25) Suzuki, N., Kawabata, N. and Yokota, M.: Methods of Grasping Smoke Movement during Road Tunnel Fires, 8th International Symposium Tunnel Safety and Security, pp.207-222, 2018.
- 26) Swiss Government, Federal Road Authority, FEDRO: “Legislation – Fire detection in road tunnels”, Edition 2007, V 2.10.
- 27) SIGRIST-PHOTOMETER AG ホームページ：FireGuard カタログ,  
<https://www.photometer.com/en/tunnel-sensors/fireguard-2/>
- 28) Vanderover, J., Wang, W. and Oehlschlaeger, M.A.: A carbon monoxide and thermometry sensor based on mid-IR quantum-cascade laser wave-length-modulation absorption spectroscopy, Applied Physics B (2011) 103: 959–966, DOI 10.1007/s00340-011-4570-8, pp.959-966, 2011.
- 29) Huang, M., Tao, L., Akagawa, T., Tain, Y., Tanaka, A., Suzuki, N. and Yokota, M.: Tunnel Fire Detection with a New Laser-Based Open-path Gas Sensor, 8th Japan/Korea/Taiwan Joint Seminar Tunnel Fire Safety and Management, pp.409-412, 2017.
- 30) 浜松ホトニクス株式会社ホームページ：ラインアップ：Si フォトダイオード,  
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/S2386-8K/index.html>
- 31) 株式会社キーエンスホームページ：商品情報：センサ：レーザセンサ,  
<https://www.keyence.co.jp/products/laser/lv-n/models/lv-nh100/>
- 32) オムロン株式会社ホームページ：商品情報：電源/周辺機器他：データロガー,  
<https://www.fa.omron.co.jp/prproducts/family/2974/>
- 33) 国土交通省 国土技術政策総合研究所ホームページ：道路関係実験施設紹介,  
<http://www.nilim.go.jp/japanese/nilim-pr/sisetuinfo/labo/road.html>
- 34) 半田隆, 須田匡, 金子和人, 山村堯樹, 長嶋敏昭, 遠藤弘一：ガソリン燃焼に伴う煙の粒径分布測定, 安全工学, Vol. 19 , No. 2 , pp.87, 1980.
- 35) 薩佐之久, 鈴木豊：発煙筒燃焼時の生成ガスについて, 消防科学研究所報, 26号, pp.28. 1989.
- 36) ダイニチ ポータースモーク説明資料, ダイニチ工業株式会社, pp.4,  
<https://www.dainichi-net.co.jp/>.
- 37) ダイニチ工業株式会社ホームページ：商品情報：スモークマシン,  
<https://www.dainichi-net.co.jp/products/smokemachine/>.
- 38) 細谷火工株式会社ホームページ：商品情報：無公害型発煙筒,  
<http://www.dainichi-net.co.jp/products/smokemachine/>
- 39) 株式会社コロナホームページ：商品情報：暖房機器：ポータブル石油ストーブ,  
<https://www.corona.co.jp/heating/oilheater/sl.html>
- 40) Kawabata, N., Matsuba, S., Ishikawa, T., Okubo, K., Shimoda, A., and Kunikane, Y.: Simulation of Waterspray for Fire Accident in Large Cross Section Tunnel, 5th International Conference Tunnel Fires, pp.69-78, 2004.

## 本論文に関する学術論文と講演発表一覧

### 1. 学術論文

鈴木直也, 川端信義, 横田昌弘

トンネル火災の早期検知についての実験検討

土木学会論文集 F2 (地下空間研究) (投稿・査読中)

### 2. 国内講演発表

- (1) 鈴木直也, 川端信義, 吉岡真敬, 横田昌弘  
トンネル火災発生時におけるレーザーガスセンサや煙検知器を用いた煙挙動の把握について (第1報)  
2017年度日本機械学会年次大会, NO.17-1, S0540202, 2017年9月
- (2) 鈴木直也, 川端信義, 横田昌弘  
道路トンネル火災の早期検知の可能性について  
2019年度日本機械学会年次大会, NO.19-1, S05413, 2019年9月

### 3. 海外講演発表

- (1) Suzuki, N., Kawabata, N., Yokota, M., Yoshioka, M.  
Methods of Grasping Smoke Movement During Road Tunnel Fire  
--Aim for Safer Road Tunnel Construction--  
8th International Symposium on Tunnel Safety and Security, pp.207-222, March, 2018.
- (2) Suzuki, N., Kawabata, N., Yokota, M.  
Researching on Methods of Early Detection and Smoke Control in Road Tunnel Fire  
18th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnel, pp.753-763, September, 2019.

## 謝辞

本研究の実施に際して、多くの方々からご支援・ご指導を賜りまして、ここに集大成として博士論文が完成しました。

私のトンネル換気・非常用設備への最初の関わりは、工学院大学の学生時代まで遡ります。1992年4月、大学4年生の春に水野明哲教授が指導する流体工学研究室へ所属し、そこから大学院修士課程修了までの3年間、高速道路のトンネル換気や非常用設備に関する実験や建設現場、供用中道路の視察などに触れ、修士論文で当時建設中であった東京湾横断道路の避難通路内換気制御シミュレーションをテーマとしました。水野教授には、きめ細やかな指導や助言ばかりでなく、高速道路トンネルの換気・非常用設備に携わる日本道路公団の職員、コンサルタント会社の担当者、設備を設計製作するメーカーの方々と引き合わせていただきましたこと感謝しております。

1995年4月に日本道路公団に入社してから、名神高速道路天王山トンネル拡幅工事や上信越道五里ヶ峯TN4車線化工事に携わり、2016年からトンネル非常用設備の共同研究に加わり、金沢大学の川端信義教授と初めてお会いしました。その後本研究に携わるため、2016年10月に金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程（機械科学専攻）に入学してから今日に至るまで、本研究に関して懇切丁寧にかつ有益なご指導・ご助言を賜りました川端信義教授に心から厚く御礼を申し上げます。また、川端教授が公立小松大学に異動後に指導教授として、本学位論文完成までご指導・ご助言いただきました理工研究域機械工学系教授の児玉昭雄教授に心から感謝いたします。

本研究に際して、様々な助言や資料提供、実験の実施などご協力いただきました中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社の横田昌弘部長、矢澤秀樹課長、山崎建一郎代理、太田巧氏、広島大学大学院先進理工系科学研究科の清家美帆助教、当時金沢大学の大学院生であった吉岡真敬氏に大変感謝しております。また、本研究の実験実施に関して、福井県丹南土木事務所、国土交通省国土技術政策総合研究所、日本電気株式会社、SIGRISTAG社、東京産業株式会社、能美防災株式会社には、格別の配慮をいただいたことに感謝いたします。

中日本高速道路株式会社に所属しながら本研究に打ち込むことに対して、ご理解とご協力をいただいた職場の上司、同僚の方々に大変お世話になり感謝しております。

また、本学位論文の審査に当たっていただきました理工研究域機械工学系教授の木綿隆弘教授、多田幸生教授、三木理教授に厚く御礼申し上げます。

最後に、地元を離れて生活しているにもかかわらず見守ってくれている両親、仕事と学生生活の両立を理解して毎日支えてくれた妻の貴子、同時期に大学受験を迎えお互いのモチベーションを高め合った大河と陸人に対して心より感謝します。

2021年3月  
鈴木 直也