

Title	「消す」「消える」ことが可能な湿度センシングに着目した消火訓練用疑似炎デバイスの研究
Author(s)	松林, 大司
Citation	
Issue Date	2024-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18986
Rights	
Description	Supervisor: 佐藤 俊樹, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

修士論文

「消す」「消える」ことが可能な湿度センシングに着目した
消火訓練用疑似炎デバイスの研究

松林 大司

主指導教員 佐藤 俊樹

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(知識科学)

令和6年3月

Abstract

Firefighting drills based on the assumption of a fire often involve judging the situation only from flames drawn on a board. A major problem is that daily firefighting drills are far removed from the actual fire scene, where it is important to evaluate the flames and smoke, make decisions on firefighting methods, and give orders to crews and other personnel to conduct activities. One of the reasons why it is difficult to conduct firefighting drills involving the burning of wood and other combustible materials in daily drills is the environmental problem of air pollution caused by the smoke generated when combustible materials are burned, and the problem of facilities that do not allow firefighting drills to be easily conducted under conditions similar to those of a fire. One possible solution to this problem is technology that simulates flames. We propose a technology that dynamically controls the size of the pseudo-flame according to changes in humidity, by combining the fog generated by an ultrasonic atomizer with a full-color LED lighting device to create a three-dimensional, highly realistic representation of the flame and by comparing the “humidity” of the space to the “oxygen concentration” in the space during combustion. Furthermore, we propose a function to reproduce the waning of flame momentum and fire extinguishing caused by direct water discharge, thereby enabling real-time reproduction of changes in flame light caused by oxidation reactions. This will enable highly effective and practical firefighting training, and will lead to the realization of a new firefighting training pseudo-flame system. The realization of this system will make it possible for firefighters to protect themselves by considering the inflow of oxygen, which is an auxiliary combustion material of flames, when they enter a room to discharge water, assuming a room fire. Therefore, when entering a hazardous area, it is important not to just rush in blindly, but to think and predict what will happen next, and to make the best judgment while minimizing the danger. This training method using the pseudo-flame device will enable highly efficient training to be repeated, and will be highly effective in creating new firefighting tactics.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の概要	3
第2章	研究目的	4
2.1	消防職員としての消火訓練の実態	4
2.1.1	消火訓練の現状と課題	5
2.2	「疑似炎の動的化」による解決	6
2.2.1	新しい動的な疑似炎に必要な要素	7
2.2.2	実現するための技術的課題	8
2.2.3	実現するための技術的課題である湿度のセンシングに着目した新しい疑似炎の提案	8
2.2.4	新しい疑似炎を用いた消火訓練の可能性	9
2.3	本研究の目的と意義	10
2.3.1	本研究の目的	10
2.3.2	本研究の意義および重要性	10
第3章	関連研究	12
3.1	現在の疑似炎ディスプレイ	12
3.1.1	3D 装飾段ボール	12
3.1.2	人工火炎ランプ	12
3.1.3	無炎 LED ランタン	13
3.1.4	VR	14
3.1.5	AR	15
3.1.6	プロジェクションマッピング	16
3.1.7	霧の疑似炎	17
3.2	疑似炎の研究論文	18
3.3	消火訓練ディスプレイ	18
3.3.1	一般市民体験用	18
3.3.2	消防士用	19

第4章	燃焼実験検証	21
4.1	燃焼時の二酸化炭素と炎の変化検証	21
4.1.1	模擬ハウス	21
4.1.2	測定に使用した機器	22
4.1.3	燃焼実験	23
4.1.4	燃焼実験結果	24
4.2	水を使用した消火時の二酸化炭素と炎の変化検証	25
4.2.1	バリエブル放水	25
4.2.2	測定に使用した機器（霧吹き）	25
4.2.3	消火実験	26
4.2.4	消火実験結果	27
第5章	実装	28
5.1	システム構成	28
5.1.1	超音波噴霧による疑似炎の発生	28
5.1.2	霧への光の投影	30
5.1.3	疑似炎の発生	32
5.2	センシング	32
5.2.1	放水検出ユニット	32
5.2.2	放水量検出のためのセンサキャリブレーション	33
5.2.3	実験と測定データ	34
5.3	外部湿度センサ	34
5.4	湿度測定検証実験	35
5.4.1	疑似炎ユニット装置作動中の室内湿度測定データ	36
5.4.2	疑似炎ユニット装置作動中の換気状況変化による湿度測定	41
5.4.3	疑似炎ユニット装置作動中開放する窓の距離を変化させた湿度測定	42
5.4.4	実験結果	44
5.5	炎の動的変化を再現する疑似炎の制御	45
5.5.1	室内への空気流入の表現	46
5.5.2	酸素濃度が低くなる表現	46
5.5.3	酸素濃度が高くなる表現	47
5.5.4	冷却消火が可能な疑似炎の表現	48
5.5.5	消火表現	48
第6章	実験	50
6.1	実験目的	50
6.2	アンケート対象	50
6.3	視覚的比較	50

6.3.1	屋外から見た夜間帯の比較	50
6.3.2	屋内の暗所の比較	51
6.3.3	明所と暗所の視覚的比較	52
6.3.4	消火訓練の炎可視化について	53
6.4	疑似炎装置を活用した消火訓練	54
6.4.1	疑似炎装置を活用した火災想定	54
6.4.2	火災想定者の必要性	56
6.4.3	フィードバックの有効性評価	57
6.4.4	放水員の判断	57
6.4.5	火災現場の表現に近い訓練	58
6.5	本実験の考察	58
6.5.1	動的な疑似炎の可視化	59
6.5.2	火災想定者	59
6.5.3	消火訓練後のフィードバックの有効性	59
6.5.4	放水員の判断	60
6.5.5	訓練における臨場感	60
6.5.6	消防職員の問題	62
6.5.7	建物の変化	63
6.6	訓練計画, 実施体制の妥当性	63
第7章	結論	65
第8章	今後の展望	67
8.1	自動化	68
8.2	手動化	68
8.3	一般市民用	69
	謝辞	70
	参考文献	71

目次

1.1	消火訓練風景(左)と現場消火風景(右) (提供:白山野々市広域消防)	1
1.2	実火災体験型教育訓練施設 ホットトレーニング (出典:令和4年度版 消防白書)	2
1.3	LEDを用いた特殊照明疑似炎演出装置 (出典:東京特殊効果)	2
1.4	消火作業中の消防士 (提供:図解でわかる危険物取扱者講座)	3
2.1	消火訓練風景 (提供:白山野々市広域消防)	4
2.2	消火訓練で使用される静的な煙(左)や炎(右) (提供:ミドリ安全)	5
2.3	図中の青色の服の人が火災想定者 (提供:白山野々市広域消防)	6
2.4	VR 想定訓練 (出典:総務省消防庁)	7
2.5	特殊照明疑似炎演出装置 (提供:Dimplex)	7
2.6	火災の3要素 (提供:図解でわかる危険物取扱者講座)	8
2.7	フラッシュオーバー (提供:消防大学校)	9
2.8	消防訓練風景 (提供:一般財団法人全国消防協会)	11
3.1	3D 装飾段ボール (出典:Boao HP から)	12
3.2	人工火炎ランプ (出典:Eleption HP から)	13
3.3	無炎LED ランタン (出典:HOTIRAI HP から)	13
3.4	防災体験VR (出典:東京消防庁 HP から)	14
3.5	ニュージーランド消防署のVRによる火災体験 (出典:AdGang)	14
3.6	Helen V. Diez らのシステムイメージ (出典:参考論文)	15
3.7	AR 火災体験 (出典:一般社団法人 AR 防災)	15
3.8	消火体験 (出典:札幌市民防災センター HP)	16
3.9	大阪城プロジェクションマッピング映像 (出典:NHK 関西 NEWS WEB)	16
3.10	能美市消防本部プロジェクションマッピングを活用した消防訓練 (出典:消防いしかわ)	17
3.11	水蒸気にLED ライトを当てた疑似炎 (出典:A-FIRE)	17
3.12	疑似炎:ガスバーナー (出典:HoloBurner から)	18
3.13	消火訓練用標的:回転式 (出典:ミドリ安全)	18
3.14	消火訓練用標的:ガス式 (出典:株式会社ニチボウ)	19
3.15	消火訓練大会用の火点標的 (出典:ミドリ安全)	19

3.16	布に描いた炎や煙の標的（出典：ミドリ安全）	20
4.1	模擬ハウス	21
4.2	燃焼機材（焚火台，固形燃料，可燃物）（左）と燃焼状況（右）	22
4.3	測定器（AZ 7755）（左）と設置状況（右）	22
4.4	模擬ハウス図	23
4.5	密閉状態（左）と開放状態（右）の測定	23
4.6	実験1回目，2回目の結果	24
4.7	ガス濃度の変化（出典：参考論文から）	24
4.8	左からストレート・スプレー・フォグ放水状況	25
4.9	霧吹きによる放水，左からストレート・フォグ放水状況	26
4.10	ストレート（左），フォグ（右）の放水状況	26
4.11	ストレート・フォグ放水測定結果	26
5.1	疑似炎デバイス全体図	29
5.2	使用した超音波噴霧器の外観	29
5.3	下部ディスプレイに設定した超音波霧発生装置と作動状況	30
5.4	塩ビ管用継手内のファン取り付け状況と下部完成写真	30
5.5	使用したLEDテープ（WS2812B）	30
5.6	上部ディスプレイ内のLEDテープライト設置状況と点灯状況	31
5.7	LEDテープライトと整流部	31
5.8	疑似炎発生ユニット作動状況	32
5.9	フォトリフレクタの固定部とガイド	33
5.10	装置を横から見たフォトリフレクタの固定位置	33
5.11	注水によるタンク沈み込み量の測定実験の様子	34
5.12	Arduinoに距離センサ測定データ	34
5.13	湿度センサモジュール外観	35
5.14	湿度計測実験の様子	36
5.15	測定データ（13分間測定，10分後にドア・窓を開放）	36
5.16	密閉状況（1分間の測定データ）	37
5.17	開放状況（1分間の測定データ）	37
5.18	測定データ（10分間，5分後にドア・窓を開放）	37
5.19	密閉状況（1分間の測定データ）	38
5.20	開放状況（1分間の測定データ）	38
5.21	2023年10月7日21時，曇，気温16.7℃ 湿度61%，風速1m（06:00で窓開放）	39
5.22	2023年10月8日9時，曇，気温18.7℃ 湿度60%，風速4m（06:00で窓開放）	39
5.23	2023年11月8日15時，晴れ，気温18℃ 湿度55%，風速7.9m（07:00で窓開放）	39

5.24	2023年11月8日21時, 晴れ, 気温 13.3℃ 湿度 74%, 風速 2.6m (05:30で窓開放)	40
5.25	2023年11月9日7時, 晴れ, 気温 11℃ 湿度 70%, 風速 2.1m (05:00で窓開放)	40
5.26	湿度測定実験場所	41
5.27	換気状況の変化実験(左:窓のみ開放, 右:窓とドアを開放)	41
5.28	窓やドアを閉めて行った場合の湿度測定実験結果	42
5.29	開放する窓と湿度センサの距離 20cmの時の様子	42
5.30	開放する窓から 20cm 離れた時の湿度状況のグラフ	43
5.31	開放する窓と湿度センサの距離 6mの時の様子	43
5.32	開放する窓から距離 6m離れた時の湿度状況のグラフ	44
5.33	湿り空気線図	45
5.34	酸素濃度が低くなる表現	46
5.35	炎が低くなる表現	47
5.36	炎が高くなる表現	47
5.37	冷却消火表現の構成図	48
5.38	通常の状態の疑似炎(左), 冷却消火中の疑似炎(右)	49
5.39	冷却消火がある程度なされた時の疑似炎(左), 消火された時の疑似 炎(右)	49
6.1	屋外での板に描いた炎と疑似炎装置の比較	50
6.2	屋外の疑似炎の比較アンケート	51
6.3	屋内での板に描いた炎と疑似炎装置の比較	51
6.4	屋内の疑似炎の比較アンケート	52
6.5	明所と暗所の視覚的比較	52
6.6	提案した疑似炎デバイスが明所と暗所のそれぞれで炎に見えるかを アンケートした結果	53
6.7	消火訓練に炎が消える表現が必要かをアンケートした結果	53
6.8	火災想定図	54
6.9	活動中の隊員が玄関から疑似炎装置を見た状況	55
6.10	訓練中の疑似炎装置への放水状況	55
6.11	活動中の隊員が玄関から見た疑似炎装置への放水状況	55
6.12	訓練中の疑似炎装置消火状況	56
6.13	活動中の隊員が放水を停止した状況	56
6.14	必要とされる火災想定者の数	57
6.15	フィードバックの評価	57
6.16	放水員の判断	58
6.17	火災現場の表現に近い訓練	58
6.18	新潟県糸魚川市の大規模火災(提供:平成29年度 消防白書)	61

6.19 出火原因別出火件数（提供：総務省消防庁 消防白書）	64
6.20 建物火災原因（提供：総務省消防庁 消防白書）	64
8.1 消防職員数（提供：令和4年度 消防白書）	67

表 目 次

3.1 現示旗等の表示一例（出典：消防教科書 消防訓練）	20
--	----

第1章 はじめに

1.1 本研究の背景

実際の火災現場では、炎や煙の状況を評価した上で [1]、消火方法を決断し、隊員等に命令し活動を行う。しかし、日頃の消火訓練は、図 1.1 左のように板に描いた炎だけで状況を判断することが多く、図 1.1 右のような現場とは状況がかけ離れていることが大きな問題として挙げられる。



図 1.1: 消火訓練風景 (左) と現場消火風景 (右) (提供：白山野々市広域消防)

日常の訓練から木材等を燃焼させる消火訓練が困難な理由として、可燃物を燃焼させた際に発生する煙が大気汚染に繋がる環境問題 [2] と、環境問題に対応している特殊な実火災体験訓練施設が、東京都にある消防大学や各都道府県の消防学校にしかなく、燃焼実験や実火災体験型教育訓練施設のように、図 1.2 のような火災に近い環境下での消防活動訓練（ホットトレーニング）が容易に実施できない施設の問題が挙げられる。また、突然の災害に対応している現場の消防隊が、燃焼訓練や実験を行っている際に災害出動があった場合、燃焼させたものを容易に消火できず、二次危険を伴うことが考えられる。以上の理由が、各消防本部や消防署で実践的な消火訓練が実施できない理由と考える。

この問題の解決手法として、炎を疑似的に再現する技術が考えられる。この疑似炎の可視表現は様々な試みがあり、例えば炎を表現した赤い布や紙に対し、下から風を当てることで炎の揺らめきを表現しているものや、コンピュータグラフィックスやアニメーション等を活用して炎を再現し、防災センター等では、VR 技術を



図 1.2: 実火災体験型教育訓練施設 ホットトレーニング (出典：令和4年度版 消防白書)

活用し消火器体験や避難体験を展示しているところもある。さらに、プロジェクションマッピングでは建物の壁等に照射し、炎を可視化した状況を消防隊に判断させ、消火訓練に取り入れている消防局や消防本部もある。しかし、従来のVR技術ではコンピュータやプロジェクタ等の様々な機器が必要であり、実際の消防機器をそのまま活用できない問題がある。また、プロジェクションマッピングでは、消防機器の活用は可能であるが、壁等の平面に投影された映像は立体感に欠け、また放水した水に対して、投影した映像を動的に変化させることができるシステムは無かった。

その他の表現では、図 1.3 のような LED を用いた特殊照明疑似炎演出装置が販売されている。この装置は炎の動きを演出するために、生成した霧に、LED の光を照射し、ヒーターの熱を放出することで、本物の炎さながらの色と揺らぎを演出表現している。しかし、現行の特殊照明疑似炎演出装置で炎の大小の変化や消火の表現は、ボタン操作で調節するものしか存在しておらず、訓練で必要とされる炎の「消火」の要素に着目したものは存在していない。



図 1.3: LED を用いた特殊照明疑似炎演出装置 (出典：東京特殊効果)

炎の大小の変化や消火の表現について、まず炎の特徴を考えると、炎には火災の3要素である「可燃物」、「熱源」、「酸素」が大きく関係している [3]。なかでも「酸素」に関しては、燃焼の助燃材であり、酸素濃度を高めることで、燃焼は促進され、逆に酸素濃度を下げると、窒息効果で炎は小さくなり、酸素濃度が15%を下回ると炎は消える [4]。

次に燃焼とは、「エネルギー（熱や光）の放出と燃焼生成物をもたらす急速な化学反応」と定義されており、酸素と化合して発熱するため、「酸化反応」とも呼ばれている [5]。この酸化反応が起こっている場所は、発熱が強くなることと、光が明るくなる2つの特徴が大きな変化である。

1.2 本研究の概要

本研究では、超音波によって生成された霧にフルカラーLEDの光を照射することによる立体感のある炎の再現と、ある空間内の酸素濃度の変化を湿度の変化に代替して検出することで疑似炎の大きさを動的に制御する技術を提案する。この手法を用いた、実際の炎の光が酸素濃度によって変化する現象をリアルタイムで再現する「消す」「消える」ことに着目した消火訓練用疑似炎デバイスを提案し、消火訓練に利用することで図1.4のように火災の現場に近い環境での訓練が可能となり、消火訓練の新しいシステムを構築できると考える。



図 1.4: 消火作業中の消防士（提供：図解でわかる危険物取扱者講座）

第2章 研究目的

本章では、消火訓練の実態として、消防職員に求められる責務と義務についてまとめ、現在の消火訓練での炎の再現手法についての問題点と、その問題点に対する改善手法の提案と可能性を述べ、最後に本研究の目的およびその意義を述べる。

2.1 消防職員としての消火訓練の実態

消防職員は、消火についての基本的な行動やスキル、消防機材などの基本的な操作や取扱い等を習熟する必要がある。災害を選択できない消防職員は、自隊の活動を主とし [6]、様々な知識や技術の向上のために日々努めている。石川県の白山市、野々市市、川北町を管轄する白山野々市広域消防本部は、図 2.1 に示すような週に 2 回の消防訓練を計画しており、また消火に対する課題と留意事項を統一するために、消防本部が企画した総合訓練を毎年 2 回実施している。

このように、消防職員であれば訓練は義務であり、決しておろそかにはできず、現場に行き続ける限り継続的に行い、行動力や活動力を身につけることが重要である [7]。



図 2.1: 消火訓練風景（提供：白山野々市広域消防）

しかし、実態としては災害や火災予防、あるいは事務対応等で週に 2 回の消火訓練は中止となる場合が多い。

2.1.1 消火訓練の現状と課題

消火訓練では、木材等を燃焼させると発生する煙が大気汚染に繋がる環境問題と、この環境問題に対応している特殊な実火災体験訓練施設が、東京都にある消防大学や各都道府県の消防学校にしかない施設の問題がある。また、突然発生する災害に対し、燃焼物を完全消火できずに出動することが危険となる等の問題から、図 2.2 のような板に描いた静的な炎や煙の状況を見て判断することが多い。



図 2.2: 消火訓練で使用される静的な煙(左)や炎(右) (提供: ミドリ安全)

しかし「絵に描かれた炎(静的な疑似炎)」を用いた訓練は、多くの場合、訓練準備段階において自隊での炎の設置作業が行われることが多いため、炎の設置場所や火災状況が訓練前から想定可能な訓練になってしまうことが問題になる。これでは臨機応変な対応が要求される現場とは大きく異なり、ただ消火活動の確認作業を行うための訓練になっていると考える。

また、絵に描いた炎を用いた訓練では、訓練者に火災の延焼状況等を口頭で伝える図 2.3 中の青色の服の人のような「火災想定者」、つまり訓練の進行役の人員の参加が必要となる点も挙げられる。

しかし、想定者による口頭での延焼状況の伝達は 4 名もしくは 5 名で活動する消防隊全体には伝わりにくく、複数人の想定者がいた場合はそれぞれの想定者が持つ炎の勢いのイメージが異なる等の問題もある。さらに、このような訓練では、実際の火災現場で必要となる「各隊員が直接目で見て状況を判断する能力」を鍛えることは困難である。

さらに、消防職員が行う消火は水を活用する事が多いが、静的な疑似炎を用いた訓練では、放水した水に対する炎の変化はない。そのため、現場では放水者が状況に応じて放水方法を変化させる必要があるのにも関わらず、訓練では消火効果を隊員自らが判断することができない。また、炎の勢いを変化させる要因は放水のみならず、実際の火災現場では延焼や可燃性ガスへの引火、窓やドアからの隊員の突入による外部空気(酸素)の流入等が挙げられる。しかし、静的な疑似炎ではこれらの変化を視覚的に再現することは困難である。



図 2.3: 図中の青色の服の人が火災想定者（提供：白山野々市広域消防）

以上をまとめると、本研究では静的な疑似炎を用いた訓練には以下のような課題があると考えられる。

1. 視覚的にリアリティのある火災現場の再現が困難
2. 延焼状況や消火活動にともなう動的な炎の勢いの変化を再現することが困難
3. 状況判断を火災想定者に頼ることになるため、訓練者それぞれが自身で状況把握を行う訓練にならない
4. 訓練に火災想定者が必要となる

以上のことを踏まえ、本研究ではこれまで「絵に描かれた静的な炎」であった消火訓練用の炎をより現実に近いものとする技術の実現を試み、これによって実現可能となる消火訓練の可能性について考察する。

2.2 「疑似炎の動的化」による解決

動的な疑似炎の例として、VRやプロジェクションマッピングの疑似炎が挙げられる。しかし、図2.4のようなVRでの訓練では活動する隊員全員が炎の共有ができないこと、普段から活用する消防機器の使用ができないこと。また、プロジェクションマッピングによる手法では、消防機器による放水は可能であるが、放水した水に対し、動的な変化と消火ができない。

以上により、これらの手法は消防職員が行う消火訓練に対しては問題と考えられる。



図 2.4: VR 想定訓練 (出典: 総務省消防庁)

一方で、霧にLEDライトを照射した疑似炎では、VRやプロジェクションマッピングの問題は解消できる。さらに、霧に対して放水することで消火の表現が可能となれば、上記の課題は解決できると考えた。

2.2.1 新しい動的な疑似炎に必要な要素

霧にLEDライトを照射した疑似炎は、現在、図2.5のような特殊照明疑似炎演出装置として販売されている。



図 2.5: 特殊照明疑似炎演出装置 (提供: Dimplex)

しかし、この特殊照明疑似炎演出装置は、炎の調節は手動で行われ、さらに放水して消火できる要素はない。

消防職員としての消火訓練に求められる要素として、以下のような課題がある
と考える。

1. 酸化反応による延焼や窒息変化
2. 様々な物に燃え移る燃焼の拡大変化
3. 消防隊の放水によって消火できる変化

以上のことが、必要な要素として考える。

2.2.2 実現するための技術的課題

消防職員が火災現場で重要な事は、火災によって命を落とさないための「人命救助」[8]、火災を最小限にするための「延焼阻止」の2つの活動である。そのためには、図 2.6 に示す火災の3要素である「可燃物」、「熱源」、「酸素」が救助や消火には重要[3]と考える。しかし、「可燃物」と「熱源」はその場所の状況によって左右されるものであるのに対し、「酸素」は消防職員が活動上、注意することが可能である。



図 2.6: 火災の3要素 (提供: 図解でわかる危険物取扱者講座)

しかし霧にLEDライトを照射した疑似炎では、燃焼しないため「酸素濃度」の変化[9]による炎の挙動変化はない。そこで、空間内の湿度センシング技術に着目した疑似炎を提案する。

2.2.3 実現するための技術的課題である湿度のセンシングに着目した新しい疑似炎の提案

室内での燃焼に伴い、熱の上昇と同じく、湿度も疑似炎デバイスにより発生する霧により、湿度は上がると考える。

以上から、空間の「湿度」を燃焼における空間の「酸素濃度」にみたてることができると考えた。これにより、湿度変化によって燃焼で引き起こされる現象（燃焼拡大や窒息効果）を湿度センシングによって提案ができ必要な要素は満たせると考える。

2.2.4 新しい疑似炎を用いた消火訓練の可能性

新しい疑似炎を用いた消火訓練の可能性の1つ目として、訓練者全員が直接炎を目で見ることができ、視覚的にその存在感を共有することが可能となる点が挙げられる。例えば、燃焼している場所がLPガスなどの延焼しやすい危険物の近くであれば、風の影響などによって緊急性が高いと判断するなどの状況把握が火災想定者を介すことなく可能になり、次の行動を迅速に判断・決定する能力を鍛える訓練が可能になる。

また2つ目として、この疑似炎が放水により「消える」ことが再現可能であれば、放水者の判断で効果の高い消火方法を判断・選択する訓練も可能になる。

さらに3つ目として、炎の助燃材である「酸素」の酸化反応による炎変化が可能となれば、風下からの室内進入や、窓やドアの開閉に留意する空気流入を考慮した消火訓練が可能となる。

これらのことが疑似炎でも可能となれば、現場状況が可視化されることで、例えば外からの空気流入を考えながら窓やドアを開閉するといった判断を各自で可能になるため、火災想定者の人数削減につながると考えられる。また、これらの行動から客観的なフィードバックを行うことも可能である。

また、命の危険性が高くなる室内進入に対して起こる酸素濃度変化が引き起こすフラッシュオーバー(図2.7)[10]やバックドラフト[11]等の再現や、その危険回避を予測する訓練が可能になれば、消防職員の火災現場における殉職者の数[12]を減らすことが可能と考える。



図 2.7: フラッシュオーバー (提供: 消防大学校)

2.3 本研究の目的と意義

上記のような可能性を有する疑似炎を実現するために、本研究ではその最初のステップとして以下の3つの要素に焦点を絞った疑似炎システムの実装を行う。

1つ目の要素として、本研究ではまず視覚的にリアリティのある疑似炎の実装を行う。

2つ目の要素として、炎の強弱を再現する機能の実装を行う。燃焼室内に活動隊員が窓やドアを開くことにより、酸素流入を促してしまい、無意識に燃焼を促進してしまう。そして既存の静的な疑似炎ではこのドアの開閉のような酸素濃度変化を検出することは困難であった。そこで、本研究では提案デバイスの湿度センシングによってこれを検出し、その検出値から炎の強弱を表現させることを実現させる。

3つ目の要素として、本研究では直接放水による炎の勢いの衰えおよび消火を再現する機能の実装を行う。

そして最後に、本研究では実装した提案疑似炎デバイスを用いた消防隊による消火訓練実験を行い、提案デバイスの消火訓練に対する有効性を探る。

2.3.1 本研究の目的

本研究の目的をまとめると、以下の通りである。

1. 湿度センシングに着目した新しい疑似炎デバイスの提案
2. 新しい疑似炎デバイスの下記3つの機能の試作開発:
 - (a) 視覚的にリアリティのある疑似炎の実装
 - (b) 湿度センシングに着目した炎の勢いの動的変化を再現する機能の実装
 - (c) 直接放水による炎の勢いの衰えおよび消火を再現する機能の実装
3. 試作疑似炎デバイスを実際に用いた消防隊による消火訓練実験による提案デバイスの有効性の検証

2.3.2 本研究の意義および重要性

「消す」「消える」ことが可能な湿度センシングに着目した消火訓練用疑似炎デバイスの研究のメリットとして次の5つが挙げられる。

1. VRやプロジェクションマッピングでは実現できない、消防機器の使用と放水に対しての動的変化が可能となる。

2. 動的な疑似炎デバイスによる消火訓練により，訓練参加者が炎の状況を共有できる。
3. 放水員の判断で放水方法を選択し消火判断を自らができる。
4. 窓やドアの開放によって酸素流入による炎の動的変化を理解できる訓練が可能となる。
5. 「考える」ことに重点を置いた新規消火訓練手法の提案ができ，新規消火戦術も生まれやすい環境が作れる。

動的な疑似炎デバイスは炎の様子をリアルタイムで視認可能であるため，訓練参加者全員のイメージを統一することが可能であり，また，放水員が炎の状況変化により柔軟に対応する放水方法や消火判断が可能となると考える。

本システムが実現されることで，隊員は訓練時に酸素流入による炎の変化とその危険性を実感することができ，炎の動的変化を考慮した訓練ができる。そのことを考えた活動が自分の身を守ることに繋がる。また，疑似炎デバイスを活用した訓練手法により，現場での炎の動的変化による危険性を実感しやすくなるため，隊員は訓練時からいかに危険を最小限にして活動するかをより考えるようになる。そのため，質の高い訓練を繰り返すことが可能になり，新規消火戦術も生まれやすい環境になると考える(図2.8)。



図 2.8: 消防訓練風景 (提供：一般財団法人全国消防協会)

第3章 関連研究

本章では、関連研究として、現在の疑似炎ディスプレイを記載し、疑似炎の論文、さらに消火訓練ディスプレイを紹介する。

3.1 現在の疑似炎ディスプレイ

3.1.1 3D 装飾段ボール

キャンプファイヤーの炎のように、薪に火が点いている表現を段ボールに表示し、複数の表示された段ボールを組み立てることで、立体的な炎の表現している(図3.1).



図 3.1: 3 D 装飾段ボール (出典: Boao HP から)

3.1.2 人工火炎ランプ

両側に赤いスポットライトを赤い布や紙に照射し、布に対しブロワーの風を下から当てることで、風による布の揺らめきと、そこに照射されるライトで炎の揺らめきを表現している(図3.2).



図 3.2: 人工火炎ランプ (出典: Eleption HP から)

3.1.3 無炎LEDランタン

摺りガラスでLEDの光をぼやけさせ、燃え盛る炎の動きは、LEDの明滅で再現し、炎の揺らめきを表現している(図3.3)。



図 3.3: 無炎LEDランタン (出典: HOTIRAI HP から)

3.1.4 VR

コンピュータグラフィックスやアニメーション等を活用して炎を再現し、VRゴーグルやスマートフォンで、炎や煙の体験ができるようになり、防災の分野でも火災や地震といった災害をバーチャルリアリティで体験できる。この体験は防災センター等の施設に取り入れられている。東京消防庁ではVR防災体験車 [13] で地震、火災、風水害編の3種類のコンテンツを小学生以上に提供している (図 3.4)。



図 3.4: 防災体験 VR (出典: 東京消防庁 HP から)

また、ニュージーランド消防署が公開した火災体験動画 [14] では、360度VRで実際の家を燃やして行われ、火災の様子を体験できる、動画ではストーブから火が燃え上がる様子や、「ヒーターの近くに物を置くと火災の原因になる」や「思い出の品は後回しに」などの火災の際の注意点が書かれている (図 3.5)。



図 3.5: ニュージーランド消防署のVRによる火災体験 (出典: AdGang)

さらに、Helen V. Diez[15] らのシステムは、「没入型 3D 環境による消防監視員のバーチャル訓練」として、Oculus Rift HMD のような没入型環境で建物全体のシミュレーションが可能となり、火災監視員の訓練生の対処方法について VR を使用しバーチャル訓練を実施し、最も安全な避難経路や、消火活動にあたる等の行動を、建物内の気流、床や壁の材質などでさまざまな要因に左右される状況をリアルタイムで訓練生に対応している (図 3.6).

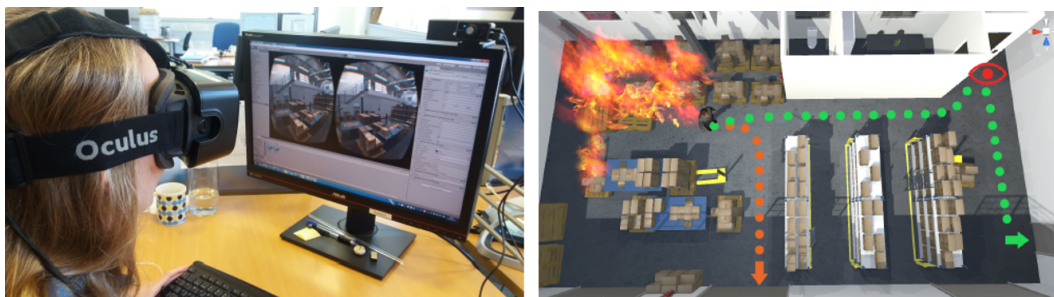


図 3.6: Helen V. Diez らのシステムイメージ (出典：参考論文)

3.1.5 AR

ARでは、シースルーゴーグル型ディスプレイやスマートフォンなどを使い、現実の風景に新たな情報を付け加えるデジタル技術で、防災分野では、自分が今いる場所に火災が発生するなどの体験ができる。現場の状況を想像でき、現実感のある体験や教育 [16] ができる (図 3.7).



図 3.7: AR 火災体験 (出典：一般社団法人 AR 防災)

3.1.6 プロジェクションマッピング

最近の防災センターでは、よりリアルに災害を再現して体験してもらうために、プロジェクションマッピングを活用している。北海道札幌市にある市民防災センターでは、コンロやストーブなどで起きた火事を、センサがついた消火器で消火体験ができる。



図 3.8: 消火体験（出典：札幌市民防災センター HP）

また、建物の壁などに照射し、炎を可視化した状況を消防隊に判断させ、消火訓練に取り入れている消防局や消防本部もある。実際に2023年3月1日、春季火災予防運動に伴い、大阪市は大阪城天守閣にプロジェクションマッピングの映像を照射し、火災想定訓練を実施している [17](図 3.9)。



図 3.9: 大阪城プロジェクションマッピング映像（出典：NHK 関西 NEWS WEB）

さらに、令和4年秋季火災予防運動期間中の11月11日（金）午後5時30分、石川県能美市内の菓子製造工場において、夜間における火災防御訓練を実施し、プロジェクションマッピングを活用しリアリティのある火災現場を再現した夜間消防訓練を実施している [18](図 3.10).



図 3.10: 能美市消防本部プロジェクションマッピングを活用した消防訓練（出典：消防いしかわ）

3.1.7 霧の疑似炎

発生させた霧にLEDの光を照射することで、光の反射や屈折を利用し、自然な炎の揺らめきを表現している。企業の「A-FIRE」は、霧にLEDを照射することにより、まるで本物の炎のように再現した。[19] 霧なので触れても熱くなく、火傷することもない、ホテルなどに取り入れ、観賞用にしており、安全性は非常に高い(図 3.11).



図 3.11: 水蒸気にLEDライトを当てた疑似炎（出典：A-FIRE）

3.2 疑似炎の研究論文

HoloBurner システム [20] は、火炎の色反応を学習するための化学実験の複合現実機器で、火炎色反応は、その独特の色で元素を識別できる現象であり、物質がさまざまな元素で構成されていることを学ぶことができ、バーナーを操作しているようなリアルな感覚と、空中画像ディスプレイによる炎のリアルな画像を提供している (図 3.12).

表 1 各元素に対応する色

元素	Li	Na	K	Cu	Ca	Sr	Ba
色	赤	黄	赤紫	青緑	橙	紅	黄緑

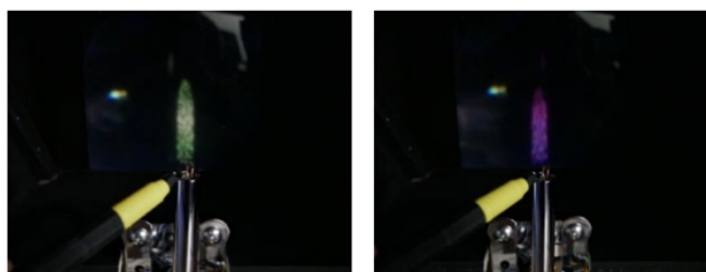


図 3.12: 疑似炎：ガスバーナー (出典：HoloBurner から)

3.3 消火訓練ディスプレイ

3.3.1 一般市民体験用

- ・消火訓練用標的：回転式

市民への消火器取扱い指導時に、水消火器を活用した消火方法の標的として使用する標的で、炎の炎心や内炎部分を狙い、当たれば標的が回るといった構造となっている (図 3.13).



図 3.13: 消火訓練用標的：回転式 (出典：ミドリ安全)

・消火訓練用標的：ガス式

株式会社ニチボウは、リアルな消火訓練を可能とする様々な機器があり、燃烧トレイ一体収納型の消火訓練機器があり、ガス供給の強弱で模擬火災を発生させることができる。また、コントロールボックスで「着火」、「燃烧」、「停止」と書かれた3つのボタンにより燃烧のコントロールが可能となる(図3.14)。



図 3.14: 消火訓練用標的：ガス式 (出典：株式会社ニチボウ)

3.3.2 消防士用

災害現場の再現を訓練を行うにあたり、災害状況を示すことは、訓練効果を高めるために大切な要素である。災害状況を判断して、活動の重点、戦術、部隊運用等を決定し、組織的、技術的な対応を迫ることが訓練の狙いであり、このための手段として「現示」が行われている。

現示資器材として、旗(火災、煙、行動障害などの表示)、発煙筒、発煙器、訓練人形及び表示板などがある。刻々と変化する緊迫した災害現場を再現することは、なかなか困難であるが、粘り強い創意工夫により訓練を進めなければならない。

屋内消火栓操法大会やポンプ車操法訓練大会で使用される標識で、火点マーク的に水を当てると的が倒れ消火したこととなる(図3.15)。

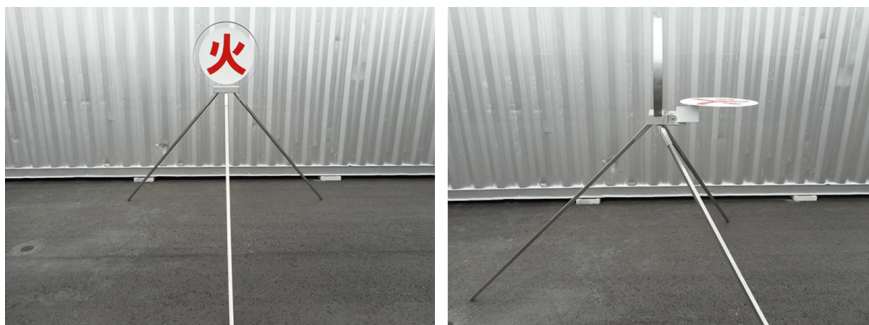


図 3.15: 消火訓練大会用の火点標的 (出典：ミドリ安全)

消防教科書の消防訓練には、現示旗等の表示および形状で以下の図を参照に作成することの例が挙げられている [21](表 3.1).

表 3.1: 現示旗等の表示一例 (出典: 消防教科書 消防訓練)

現示	現示旗等の表示及び形状、寸法	基準	運用方法	摘要
火の表示	1 単位 	火勢制圧には、「1口で1分」の注水が必要。	1 表示された旗のある場所の状況を示す。 2 火災の進展、消防力の投入状況等により現示を変化させる。この場合、注水時間に対応して「火炎の表示」を下位の単位又は「煙の表示」に変える。 3 時間経過により段階的に消防力が投入された場合は、「基準」の時間内で注水に必要な時間を弾力的に設定する。	1 表示は、開口部及び必要により屋内、屋外に行う。 2 時間経過に伴う延焼面積及び1口の担当範囲は、建物構造、規模及び区画に応じて設定する。 3 旗の形状、寸法は共通とする。
	2 単位 	火勢制圧には、「1口で2分」「2口で1分」の注水が必要。		
	3 単位 	火勢制圧には、「1口で3分」「2口で1分30秒」「3口で1分」の注水が必要。		
	4 単位 	火勢制圧には、「1口で4分」「2口で2分」「3口で1分30秒」「4口で1分」の注水が必要。		
煙の表示	うすい煙 	1 煙が少ないため屋内進入に呼吸器を必要としない。 2 要救助者の救出も可能。	1 煙の表示は、時間経過により「うすい煙」「濃煙」「濃煙・熱気」の状態に変化させる。 2 中性帯は、注水又は開口部の開放により「濃煙」又は「濃煙・熱気」に変える。 3 注水及び筒先配備の対応が必要でなくなった時点で現示を中止(旗を撤去)する。	1 表示は、開口部及び必要により屋内、屋外に行う。 2 旗の形状、寸法は共通とする。
	濃煙 	屋内進入には、呼吸器及び警戒筒先が必要。		
	濃煙・熱気 	屋内進入には、呼吸器及び保護注水が必要。		

さらに、板や布に描いた炎や煙は以下の写真のとおりである。炎の標識は煙や炎の量の違う標識があり、燃焼建物の火災の状況を把握できるようにしている(図 3.16).



図 3.16: 布に描いた炎や煙の標的 (出典: ミドリ安全)

第4章 燃焼実験検証

本章では、本研究が着目する「酸化反応で起きる炎の光の変化」について分析を行う。しかし、疑似炎には燃焼がなく、酸化反応は発生しない。そこで木材を燃焼させた場合に必ず発生する可燃性ガスの「二酸化炭素」に着目し、その「二酸化炭素」と疑似炎の関係性を結びつけることで、「酸化反応による炎の変化」を疑似炎で再現可能かを検証する。また、水を活用した冷却消火方法による「二酸化炭素」の変化も検証する。

4.1 燃焼時の二酸化炭素と炎の変化検証

4.1.1 模擬ハウス

厚さ 10mm, 横 91cm, 縦 91cm, 高さ 91cm の難燃性素材（石膏ボード）を使用し、立方体の模擬ハウスの前面には 25cm 四方の開口部を作り、耐熱ガラスを取り付け、開閉可能とする窓を設置した (図 4.1)。この立方体は室内を密閉状態とし、また窓を開くことにより酸素が入る状況を作成した。



図 4.1: 模擬ハウス

4.1.2 測定に使用した機器

- 燃焼機材

使用した焚火台は、ステンレス製で組み立て時、直径13.5cm、高さ18.5cm、ストーブ式、固形燃料ホルダー付きのウッドストーブであり、本体下部の空気穴から空気が入り、高い燃焼性のある焚火台である(図4.2左)。その焚火台にロウソクを設置し、ロウソクに火を付けた状態で、割り箸等の木材を入れ燃焼させる(図4.2右)。



図 4.2: 燃焼機材（焚火台，固形燃料，可燃物）(左)と燃焼状況(右)

- 測定機器

使用した測定機器は「AZ 7755」(図4.3左)、温度、湿度、二酸化炭素が測定可能。測定装置設置位置は、焚火台から開口部側に10cm離れた位置として測定した(図4.3右)。



図 4.3: 測定器 (AZ 7755)(左)と設置状況(右)

4.1.3 燃焼実験

図4.4のように、模擬ハウス内の中央で焚火台に入れた木材を燃焼させ、二酸化炭素測定値と炎の高さをリアルタイムに測定する。

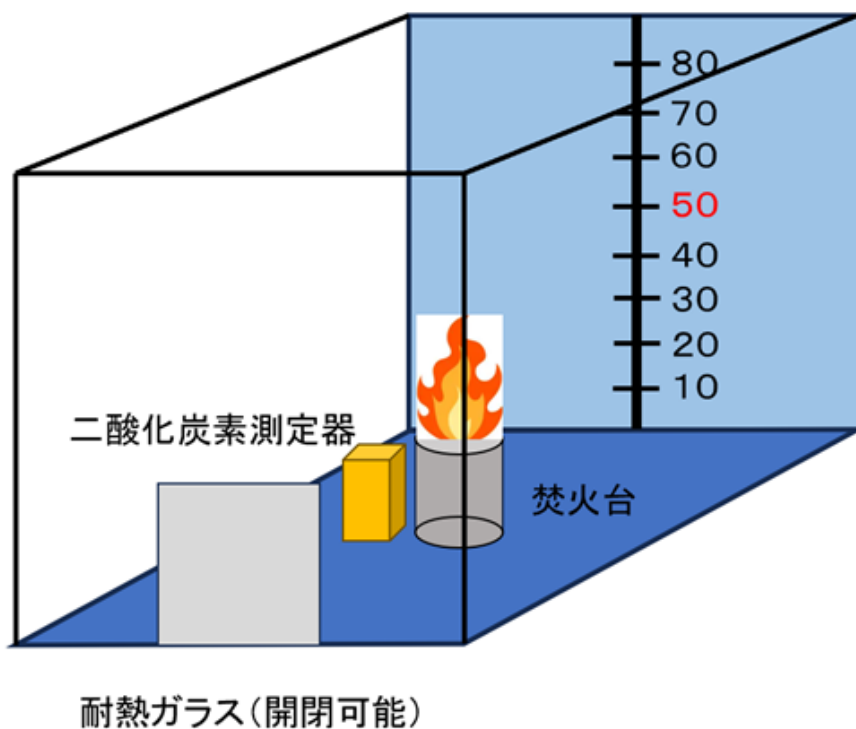


図 4.4: 模擬ハウス図

密閉状態 (図 4.5 左) と開口部を開き空気の流入が可能な状態 (図 4.5 右) の 2 通りを検証する。



図 4.5: 密閉状態 (左) と開放状態 (右) の測定

4.1.4 燃焼実験結果

実験を行ったデータをグラフで表す(図 4.6).

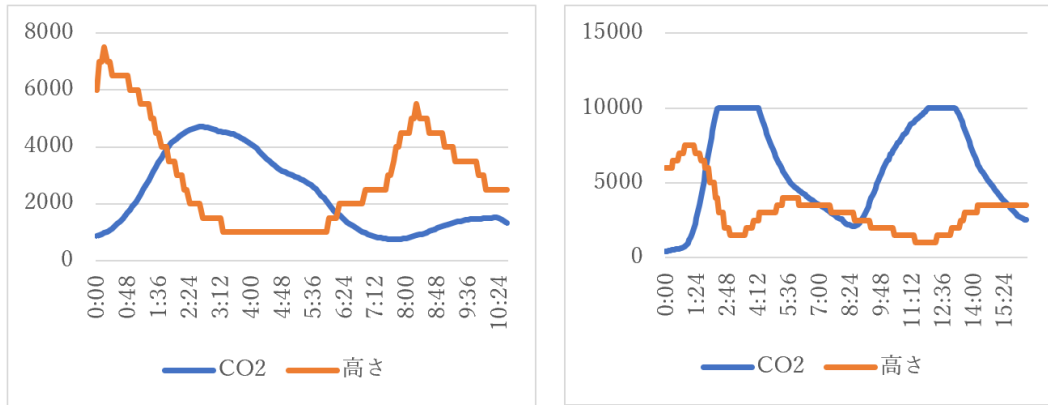


図 4.6: 実験 1 回目, 2 回目の結果

燃焼時の二酸化炭素と酸素濃度の関係性は深く、また炎の高さによる変化にも関係していることが立証できた。

2 回の実験結果、炎の高さは二酸化炭素測定値の上昇に伴い小さくなり、また開口部を開放し酸素流入した状態では、二酸化炭素測定値の下降に伴い大きくなる事が立証できた。さらに、真下らの論文 [22] では、一室を使用した火災実験を実施し、ガス濃度の変化について検証したデータがある。ここでは「酸素」と「二酸化炭素」の関係性がグラフで検証されており、今回の実験結果(図 4.7)との共通部分が見られる。

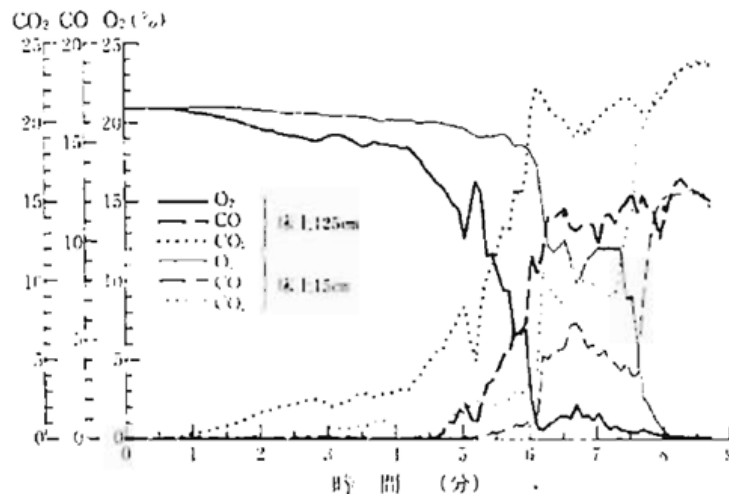


図 4.7: ガス濃度の変化 (出典: 参考論文から)

この実験で、密閉状態で燃焼が続いている際、二酸化炭素濃度の増加に伴い、炎

の高さは低くなり、開口部を開き密閉を解除すると、室内に酸素が流入し二酸化炭素濃度は低下、炎の高さは少しずつ上昇していくことを立証できた。

4.2 水を使用した消火時の二酸化炭素と炎の変化検証

冷却消火時の二酸化炭素と炎の変化を検証する。

4.2.1 バリアブル放水

消防士が現場で活用している放水要領に近づけて実験を行う。バリアブル放水は、図 4.8 のストレート (左) やスプレー (真ん中)、フォグ (右) の各ストリーム・パターンに切り替えて放水する方法で、ノズル先端部でストリーム・パターンを調節できるようになっている。放水量が同じであっても、水滴の粒子が小さくなると、熱と接触する表面積が大きくなり、より多くの熱を効率よく吸収できるようになる [23]。



図 4.8: 左からストレート・スプレー・フォグ放水状況

バリアブル放水の長所は、屋外や屋内の状況に合わせてパターンを調整することができ、筒先を持つ放水隊員が状況を判断して切り替えられることである。

4.2.2 測定に使用した機器 (霧吹き)

先端のノズルを捻ることにより、ストレート (図 4.9(左)) とフォグ (図 4.9(右)) の放水変化が可能な霧吹きを使用する。



図 4.9: 霧吹きによる放水, 左からストレート・フォグ放水状況

4.2.3 消火実験

第 4.1.3 節で使用した模擬ハウス内の燃焼物に対し, 開口部付近から霧吹きでストレート放水 (図 4.10 左) とフォグ放水 (図 4.10 右) の 2 通りの方法で実施し, 二酸化炭素と炎の高さを測定する.



図 4.10: ストレート (左), フォグ (右) の放水状況

実験を行ったデータをグラフで表した (図 4.11).

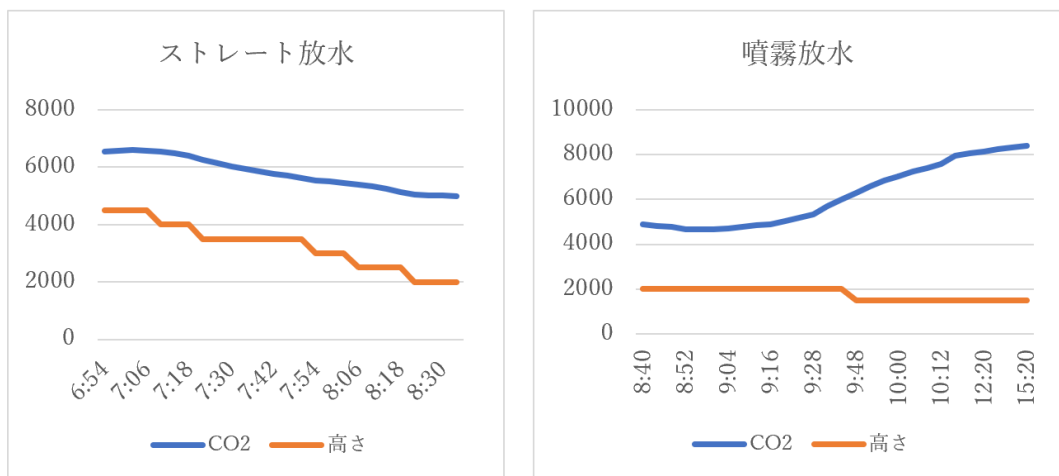


図 4.11: ストレート・フォグ放水測定結果

4.2.4 消火実験結果

消火の方法を2通り実施した。

ストレート放水とフォグ放水によって、炎の高さは低くなるのに対し、二酸化炭素測定値の変化は一定するものではなく、関係性は確認できなかった。しかし2通りの放水方法も燃焼室内に放水を実施した時に炎の高さは低く変化しており、放水量が増えればそれと比例して高さも低くなることを立証できた。

第5章 実装

本章では、作成した疑似炎デバイスの実装について述べる。

従来の消火訓練で使用される炎の目標物は、布もしくは板で描かれている静的な疑似炎であった。そこで本研究では、視覚的にリアリティのある炎の動き、また放水した水に対し消火できる動的な疑似炎を追求するために、超音波噴霧器で発生させた霧(細かい水滴)に対しLEDの光を照射することで、炎の「色」、「明るさ」、「揺らぎ」などを再現可能にする。

また、「酸化反応で起きる炎の光の変化」、つまり酸素濃度に応じた炎の明るさ・色の変化を、湿度センサおよび Arduino 等のマイクロコントローラによる制御によってリアルタイムに再現可能にする。さらに、「冷却消火が可能な疑似炎」、つまり放水による消火機能も放水された水の量をリアルタイムに計測する機構を組み込むことで実現する。

5.1 システム構成

図 5.1 はシステム構成の概要である。提案する疑似炎装置は、疑似炎発生ユニット(超音波噴霧器、フルカラー LED およびファン)、外部湿度センサユニット、放水検出ユニット(放水量検出カップおよび放水量測センサ)、及びセンサ・LED 等の制御用マイクロコントローラ (Arduino)、およびデータ記録用の計算機からなる。

5.1.1 超音波噴霧による疑似炎の発生

今回の実装では、超音波噴霧装置を用いて発生させた霧状の水をファンを用いて装置上部から放出し、これにフルカラー LED の様々な「色」や「強さ」の光を照射させることで安全な疑似炎を作り出した。使用した霧発生装置は、小型の超音波噴霧装置 (HS0055-221130)(図 5.2) を 6 個使用し、内蔵するタンク内の水を噴霧可能にした(図 5.3)。

図(図 5.3(右))は超音波霧発生装置を発生させた状況である。

発生させた霧は、DC ファン(図 5.4)を用いて装置外部から吸引した空気を装置上部へ放出させることで上部から立ち昇らせる。

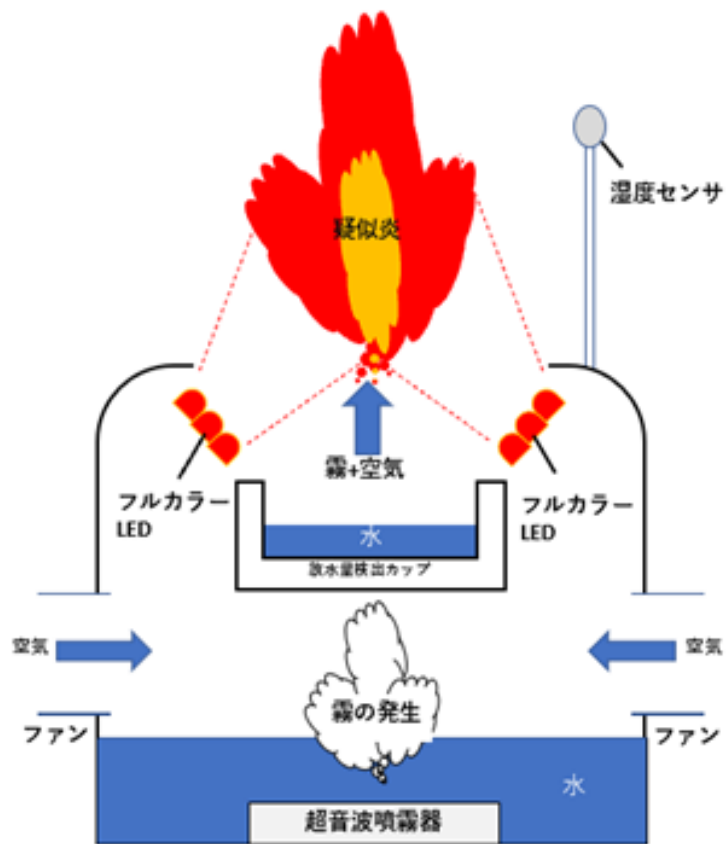


図 5.1: 疑似炎デバイス全体図



図 5.2: 使用した超音波噴霧器の外観



図 5.3: 下部ディスプレイに設定した超音波霧発生装置と作動状況

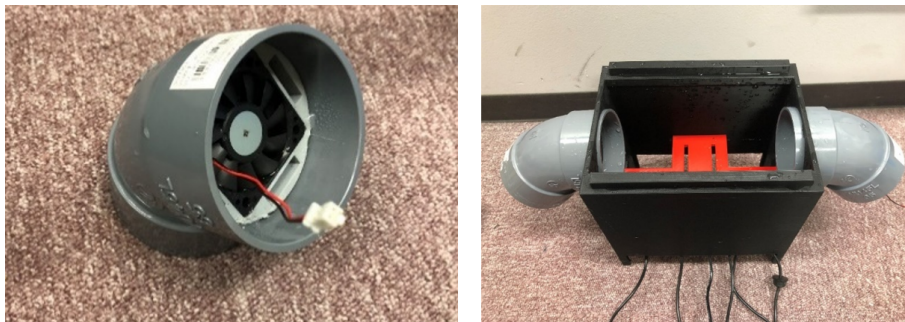


図 5.4: 塩ビ管用継手内のファン取り付け状況と下部完成写真

5.1.2 霧への光の投影

装置上部から発生させた霧へは、霧の出口に配置したテープ型LED(WS2812B)を用いて光を照射する。このテープ型LEDは1mの長さに144個のWS2812Bチップ型フルカラーLEDが並んだもので、すべてのLEDに対し独立して色・光の強さを自由に設定可能である(図5.5)。またLEDテープライトの配置例を図5.6に示す。



図 5.5: 使用したLEDテープ (WS2812B)

発生した霧は、装置上部の格子を通過することで整流された後にLEDによる光が照射され、装置外部に放出される(図5.7)。

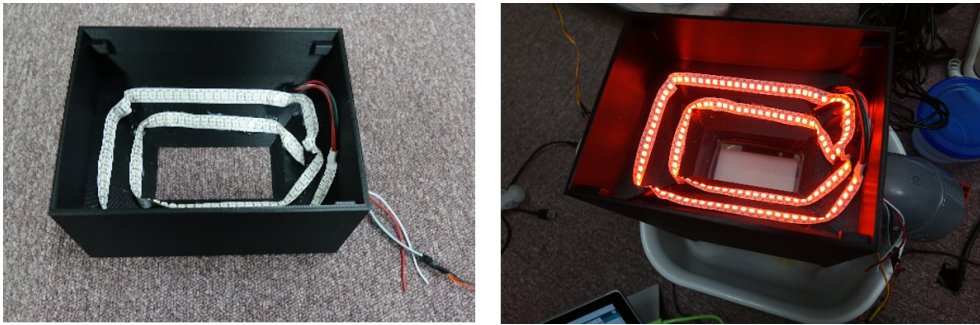


図 5.6: 上部ディスプレイ内の LED テープライト設置状況と点灯状況



図 5.7: LED テープライトと整流部

5.1.3 疑似炎の発生

図5.8は炎の色を赤に設定し疑似炎を発生させた様子である。なお、単色のみならず、例えば炎は外側ほど酸素濃度が高く、濃度に応じて炎心、内炎、外炎と3つに区分しているが、疑似炎でも同じく視覚的に炎心、内炎、外炎に分けた状況が表現可能である。



図 5.8: 疑似炎発生ユニット作動状況

5.2 センシング

次に、疑似炎を動的に制御するために必要なセンサの実装について述べる。

5.2.1 放水検出ユニット

第4.2.4節で述べたように、二酸化炭素と冷却消火の関係性を検証したが、放水形態の違いで二酸化炭素と炎の高さの変化に因果関係はなく、消火システムの方法を湿度のデータに置き換える事ができないと判断した。

しかし、放水量が増えれば炎の高さが低くなることが立証できたことから、放水による消火は燃焼実態への注水が重要であることに着目した。

そこで疑似炎システム装置部分への放水量を測定し、消火できるシステムを作成した。今回の実装では、疑似炎が放水された場合に水がたまるタンクを装置内部のバネ機構（線形0.4mm、外径5mm、長さ20mmで最大荷重0.31kg、最大圧縮5mm）（図5.10）上に設け、GENIXTEX CORP メーカーのTPR-105 フォトリフレ

クタ（反射型フォトセンサ）を用いてこのタンクの重さをタンクの沈み込み量を計測することで放水量の目安とすることにした。なお、タンクは水が溜った場合に垂直に沈むよう、ガイドを作成した(図 5.9)。

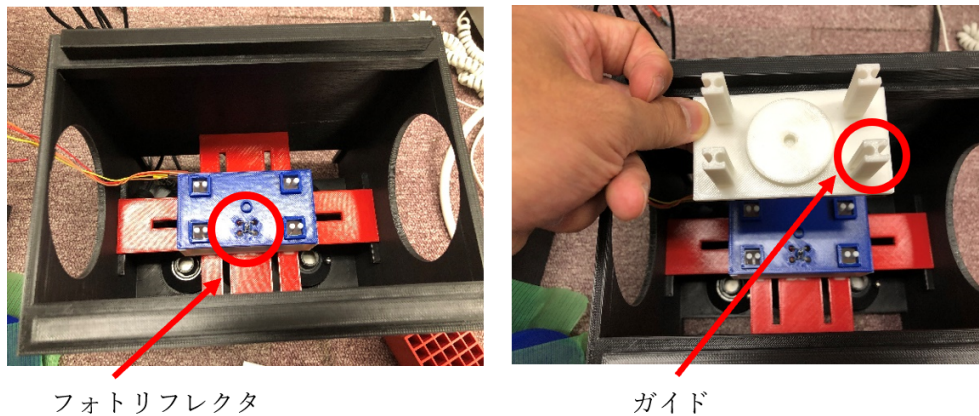


図 5.9: フォトリフレクタの固定部とガイド



図 5.10: 装置を横から見たフォトリフレクタの固定位置

5.2.2 放水量検出のためのセンサキャリブレーション

まず放水量と押しバネの沈み込み量の関係性を調べる実験を行った。消火システム装置を組み立て、その上に容量 400ml のタンクを置き、箱内に注水した水の重さで沈み込むタンクのフォトリフレクタとの距離を測定する。注水に使用したのは 60ml のシリンジで、水を 10ml ずつタンクの中に注水し、フォトリフレクタの返す値の変化を読み取った。

5.2.3 実験と測定データ

まず実験の様子を図 5.11 に示す。

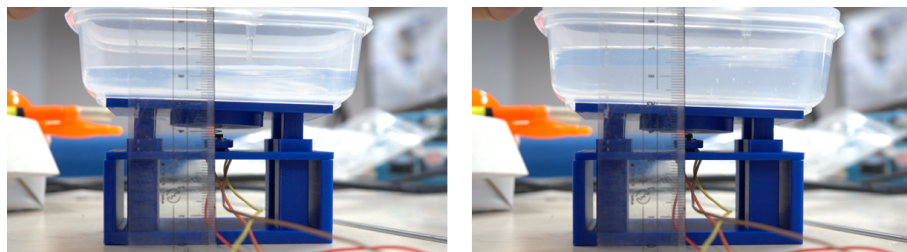


図 5.11: 注水によるタンク沈み込み量の測定実験の様子

今回用いたバネの長さは 20mm であるが、最大限圧縮は 5mm である。またフォトトリフレクタが返す値の範囲は、初期値を 0 とすると最大値は 120(400ml 注水時)の範囲であることがわかった (AD 変換の分解能は 10bit)。なおフォトトリフレクタの初期測定値に統一性はなかったが、測定幅は 120 で統一性は認められた (図 5.12)。

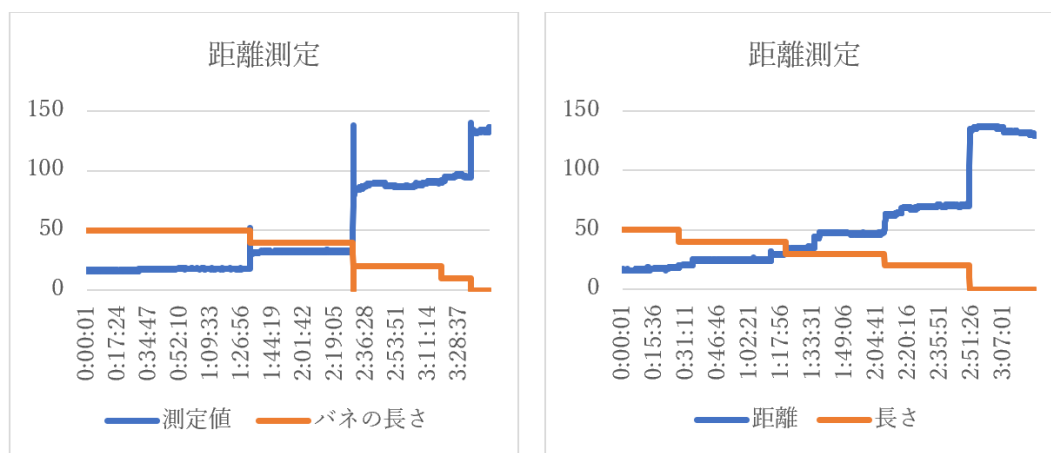


図 5.12: Arduino に距離センサ測定データ

5.3 外部湿度センサ

第 1.2 節の本研究の概要に記載したとおり、提案手法では空間の「湿度」を燃焼における空間の「酸素濃度」にみたと疑似炎の大きさを動的制御する技術を提案するため、第 5.1.1 の疑似炎ユニット装置に、湿度センサを設置し室内空間内の湿度をリアルタイムに測定する。この結果から室内の空気流入などによる湿度の変化を検証し、疑似炎デバイスが接続された計算機上でファンの強弱を調整し、「酸化反応で起きる炎の光の変化」の再現を試みた。

使用した湿度センサは SENSIRION 社製の高精度温湿度センサ SHT31-DIS を搭載した湿度センサモジュールで、8 秒間隔で温度と湿度の 2 つの環境情報を同時に測定できる (図 5.13)。なお、SHT31-DIS センサの湿度測定精度は、仕様では相対湿度 $\pm 2\%$ (0%~100%) となっている。

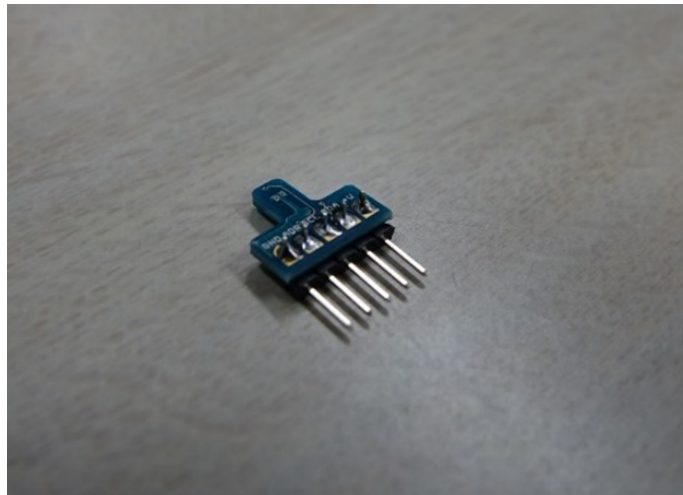


図 5.13: 湿度センサモジュール外観

5.4 湿度測定検証実験

ここで、このセンサを用いた湿度測定検証実験について述べる。屋内環境の湿度変動の要因は温度変化および水蒸気の流出入に起因するものと考えられているが、水蒸気の流出入の影響は閉鎖された室内の場合には少ないと考えられている [24]。

このことから、疑似炎ユニット装置を設定し、密閉中で空気の流出入がない状況とドアや窓を開口し空気の流出入が可能な状況の 2 つの湿度変化について測定した。また、環境の変化も考え、白山野々市広域消防本部訓練塔と 2023 年 2 月に建築した住宅の 2 か所で湿度測定する (図 5.14)。

湿度センサの位置は、床から 1.0 m の高さの位置では、疑似炎ユニット装置から発生する水蒸気が湿度センサに当たり、湿度センサが高湿度に反応してしまうため、水蒸気が当たらない 2.0 m の高さを設定位置とした。

この 2.0 m の高さで測定すると、疑似炎ユニット装置の作動前と作動後の湿度変化は変化がなく、疑似炎ユニット装置から発生する水蒸気には干渉しないことが確認できたため、2.0 m の高さで湿度測定実験を行う。



図 5.14: 湿度計測実験の様子

5.4.1 疑似炎ユニット装置作動中の室内湿度測定データ

次に、実験条件および湿度計測の結果を示す。

まず消防本部訓練塔 (2023年9月23日, 17時, 天候 曇, 気温 24℃ 湿度 70%, 風速 1m) の結果を図 5.15 に示す。なお13分間の測定を行い, 10分後にドアおよび窓を開放した。なおグラフの横軸は時間, 縦軸は湿度 (%) を示している。

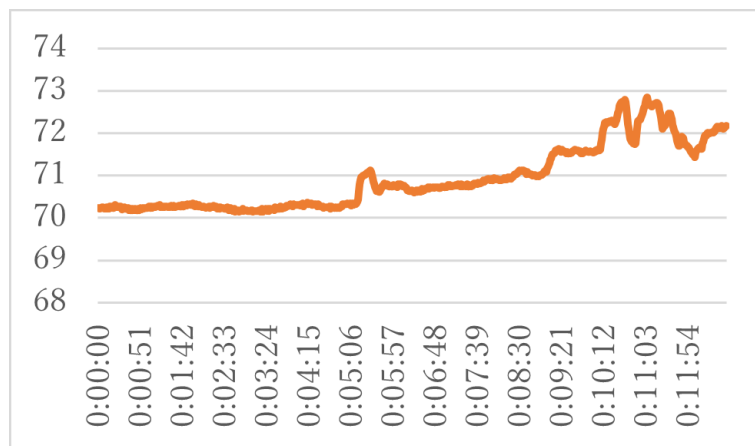


図 5.15: 測定データ (13分間測定, 10分後にドア・窓を開放)

同様に、ドア・窓の開閉を行わない、常に密閉状態・常に開放状態だった場合の測定結果(ともに1分間の計測)も図5.16と図5.17にそれぞれ示す。

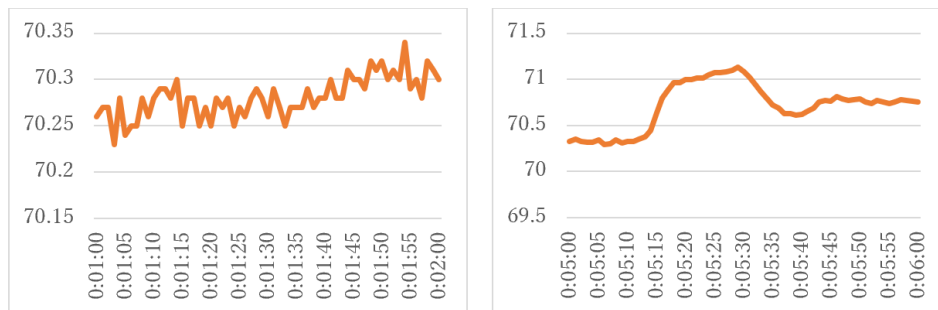


図 5.16: 密閉状況 (1分間の測定データ)

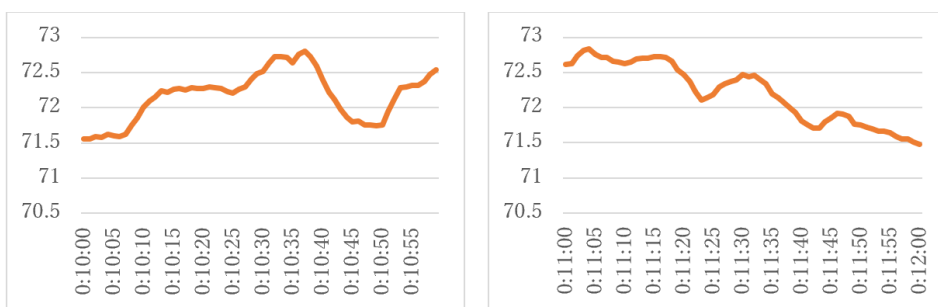


図 5.17: 開放状況 (1分間の測定データ)

これらの結果から、ドア・窓を開放したことで、1%以上の湿度値の変化がセンサで計測可能であることが分かった。

次に、一般的な住宅内での測定データ(2023年9月25日, 9時, 天候 晴れ, 気温 27℃ 湿度 54%, 風速 1m)を図5.18に示す(10分間, 5分後にドア・窓を開放)。

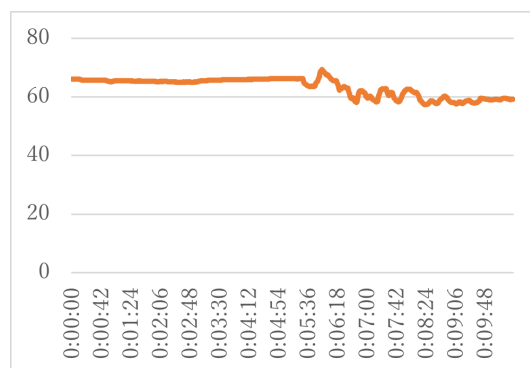


図 5.18: 測定データ (10分間, 5分後にドア・窓を開放)

続いて、密閉状況（1分間の計測）の結果，開放状態の結果をそれぞれ図5.19と図5.20にそれぞれ示す。

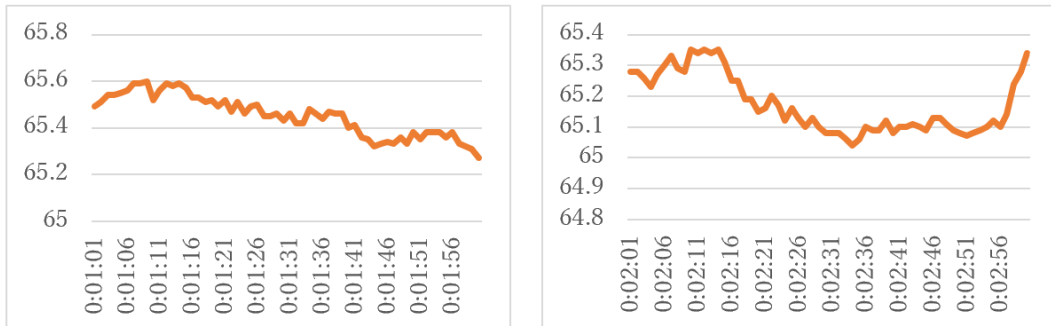


図 5.19: 密閉状況（1分間の測定データ）

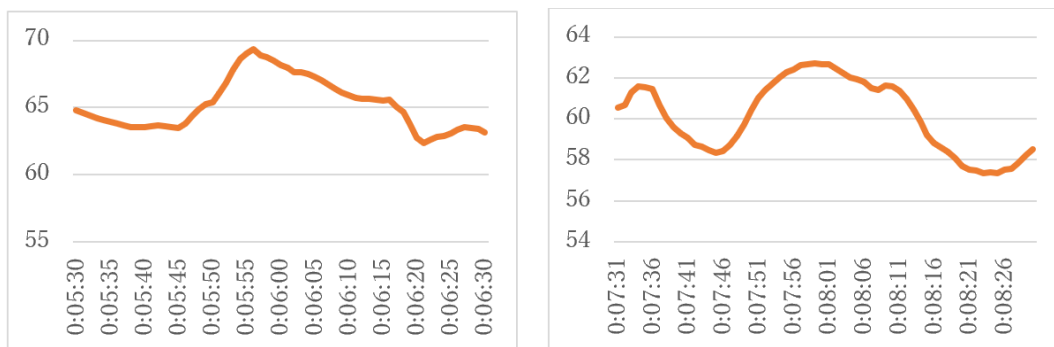


図 5.20: 開放状況（1分間の測定データ）

これらの結果からもドア・窓の開放時に1%以上の湿度の変化が観測された。その他，次のような条件で数回の実験を繰り返し行った時の結果もあわせて図5.21, 図5.22, 図5.23, 図5.24, 図5.25を掲載する。

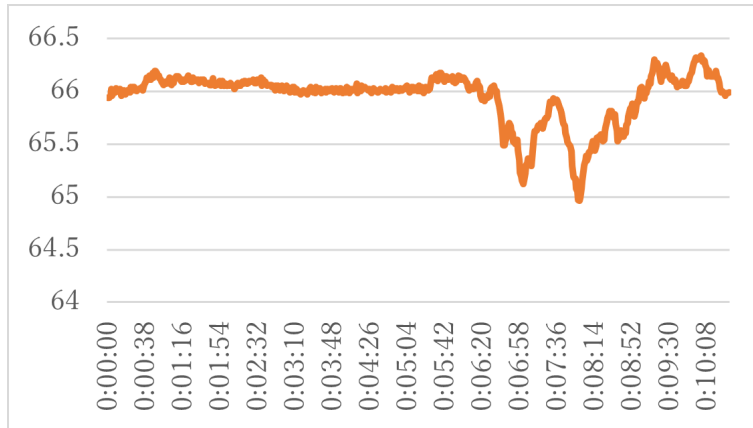


図 5.21: 2023年10月7日21時, 曇, 気温16.7℃ 湿度61%, 風速1m (06:00で窓開放)

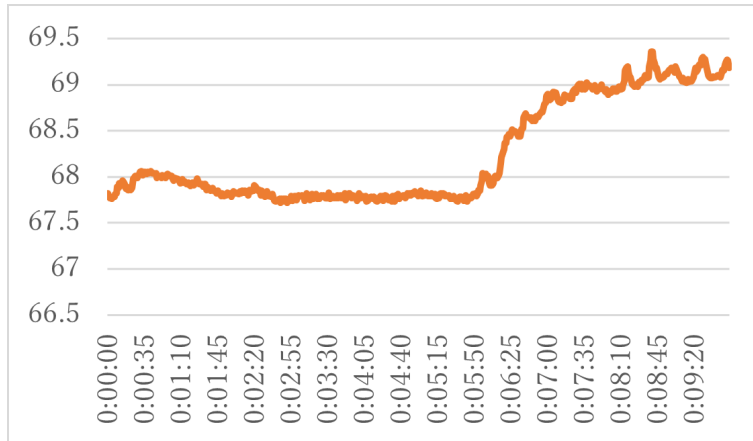


図 5.22: 2023年10月8日9時, 曇, 気温18.7℃ 湿度60%, 風速4m (06:00で窓開放)

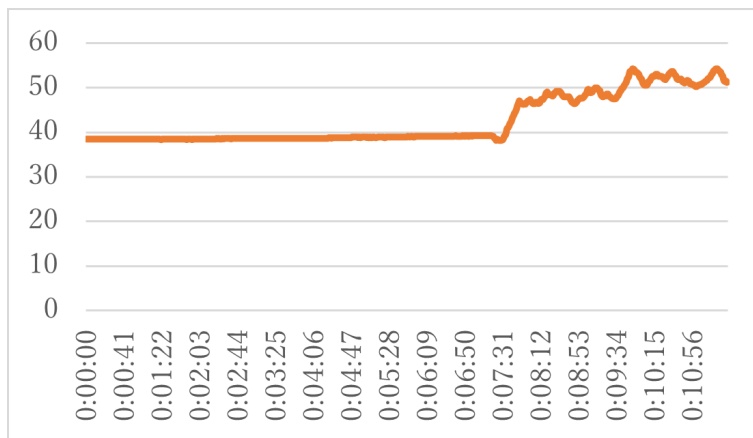


図 5.23: 2023年11月8日15時, 晴れ, 気温18℃ 湿度55%, 風速7.9m (07:00で窓開放)

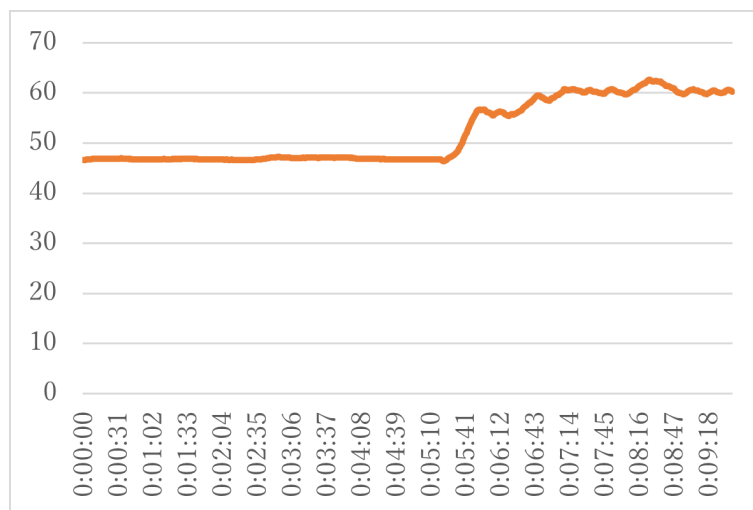


図 5.24: 2023年11月8日21時, 晴れ, 気温13.3℃ 湿度74%, 風速2.6m (05:30で窓開放)

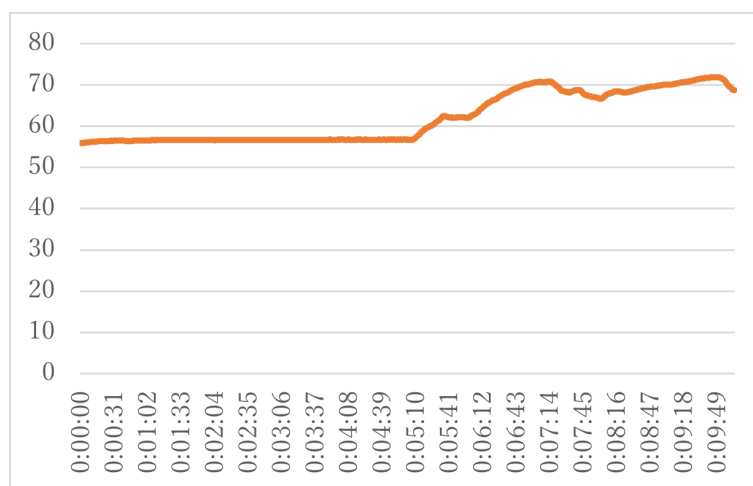


図 5.25: 2023年11月9日7時, 晴れ, 気温11℃ 湿度70%, 風速2.1m (05:00で窓開放)

以上のように, 計17日間, 50回の測定を場所, 気温, 湿度が違う状況で測定した結果, 密閉の際は湿度変化は1%未満で, 窓の開放時には1%以上の増減が認められた。

5.4.2 疑似炎ユニット装置作動中の換気状況変化による湿度測定

次に、室内の風通りの良い状況と無風に近い状況による換気状況変化の湿度変化を測定した。実験場所は北陸先端科学技術大学院大学 知識科学棟3階(図5.26, 図5.27)であり、実験日時・天候は10月20日17時, 晴れ, 気温17℃ 湿度90%, 風速5.9mである。図5.27左は窓のみの開放であり, 図5.27右は窓とドアを開放した状況である。密閉した状況で湿度測定を実施する。測定開始から5分後に外に繋がる窓を開放し, 測定開始から6分30秒後に廊下側のドアを開放する。



図 5.26: 湿度測定実験場所

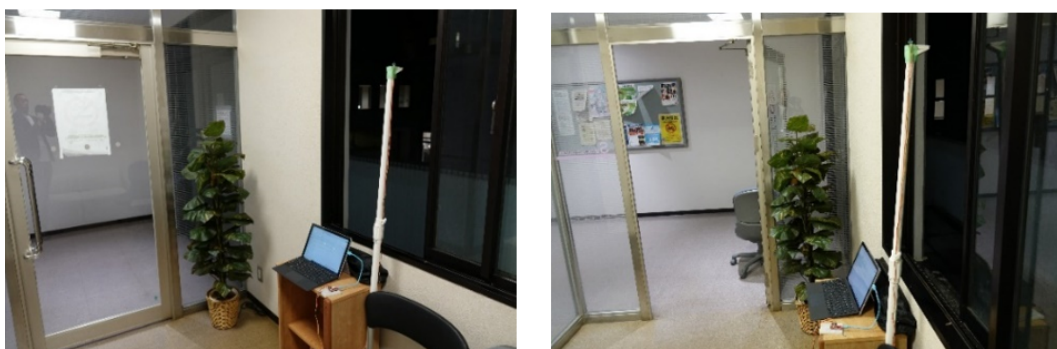


図 5.27: 換気状況の変化実験 (左: 窓のみ開放, 右: 窓とドアを開放)

また、図 5.28 は窓やドアを閉めた場合の結果である。

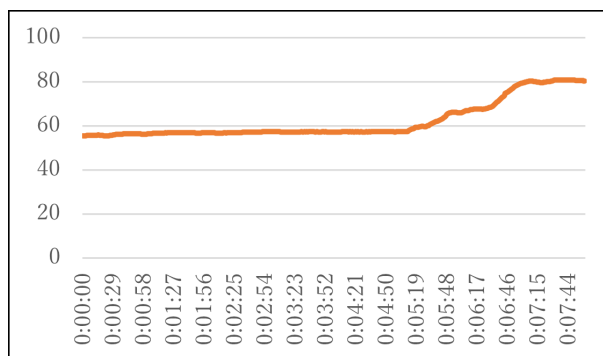


図 5.28: 窓やドアを閉めて行った場合の湿度測定実験結果

5.4.3 疑似炎ユニット装置作動中開放する窓の距離を変化させた湿度測定

室内の測定位置によって起こる湿度変化を測定する。開放する窓と湿度センサの距離を 20cm 離れた条件と 6 m離れた条件で湿度測定を実施し測定データを比較する。

実験日時は令和 5 年 10 月 23 日 16 時 00 分と 21 時 00 分であり、実験場所は白山野々市広域消防本部の 2 階屋内訓練場である。

開放する窓と湿度センサの状況を図 5.29 に示す。図 5.29 左が 16 時 00 分の様子であり、図 5.29 右が 21 時 00 分の様子である。赤丸で示した箇所が湿度センサの設置位置である。



図 5.29: 開放する窓と湿度センサの距離 20cm の時の様子

開放した窓から湿度センサの距離を 20cm 離れた湿度状況のグラフを図 5.30 に示す。図 5.30 左のグラフが 16 時 00 分の様子であり、図 5.30 右のグラフが 21 時 00 分の様子である。

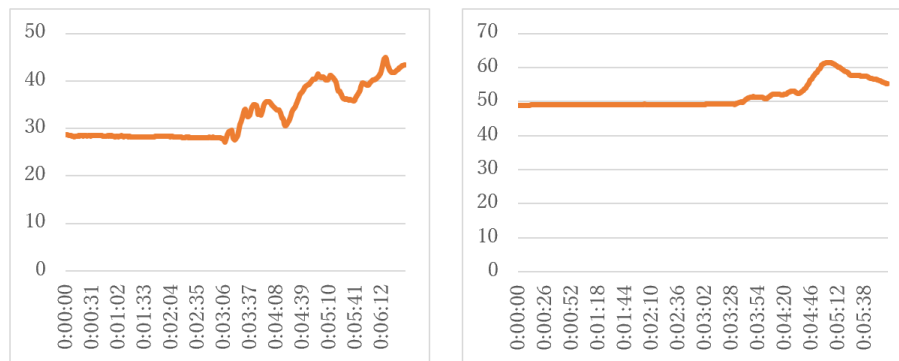


図 5.30: 開放する窓から 20cm 離れた時の湿度状況のグラフ

同じ条件で湿度センサの設置位置だけを窓から 6m 離れた場所に設置する。開放する窓と湿度センサの距離 6 m の状況を図 5.31 に示す。赤丸で示した箇所が湿度センサの設置位置である。

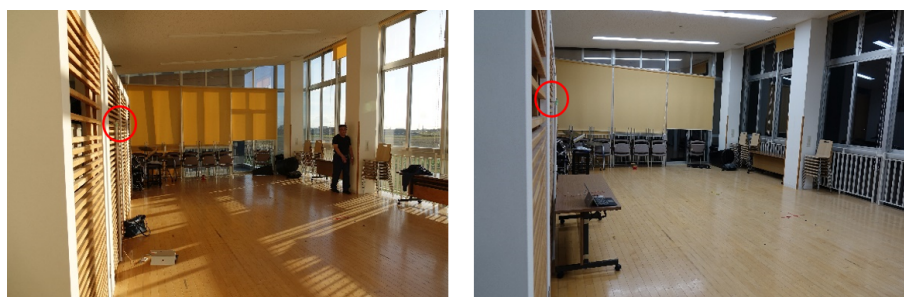


図 5.31: 開放する窓と湿度センサの距離 6 m の時の様子

開放した窓から湿度センサの距離を 6m 離れた湿度状況のグラフを図 5.32 に示す。図 5.32 左のグラフが 16 時 00 分の様子であり、図 5.32 右のグラフが 21 時 00 分の様子である。

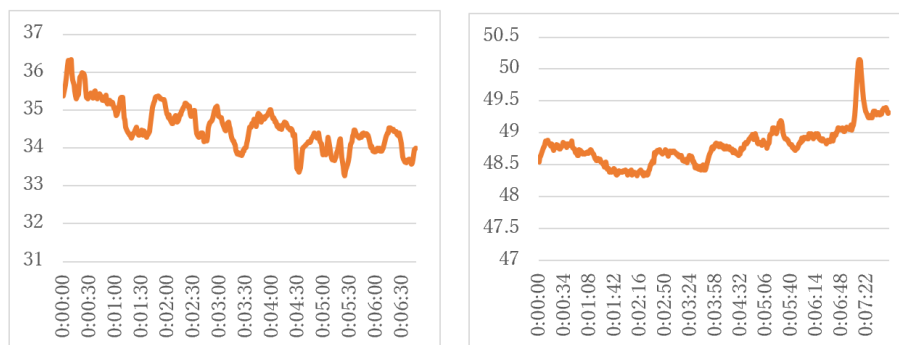


図 5.32: 開放する窓から距離 6 m 離れた時の湿度状況のグラフ

5.4.4 実験結果

祖父江らの評価 [25] によると、居住空間における温度と湿度の変化の観測は、窓やドアの開閉が少なければ温度と湿度の変化は小さい。よって、消防訓練塔と住宅の 2 か所で時間帯や気候（晴・曇・雨）の条件を変え、数回の測定実験を行った結果、室内が密閉状態では 1 分以内の範囲で 1 % 未満の変化に留まるのに対し、窓やドアを開放すると 1 分以内に 1 % 以上の変化が認められた。

さらに、空気の流入が激しい時（風が強い時、同空間で 2 か所以上窓やドアを開放した時）は空気の流入が少ない時と比較し、湿度変化は激しく、また、窓やドアの距離が近い時は遠い時と比較し湿度変化は激しいことがわかった。

また、土屋らの検証では、結露発生メカニズムを説明しており、「空気中には多かれ少なかれ水蒸気が含まれている。ある限定された空間に水蒸気を加えると、やがて一杯となりそれ以上は入らなくなる。この状態を飽和といい、含みうる最大の水蒸気量は空気温度に依存し、温度が高くなるにつれ 2 次曲線的に増加する。図（本文中に図 5.33 として引用する）は横軸に温度を、縦軸に絶対湿度（または水蒸気圧）をとり相対湿度を曲線で示したもので、湿り空気線図と呼ばれている。」 [26]

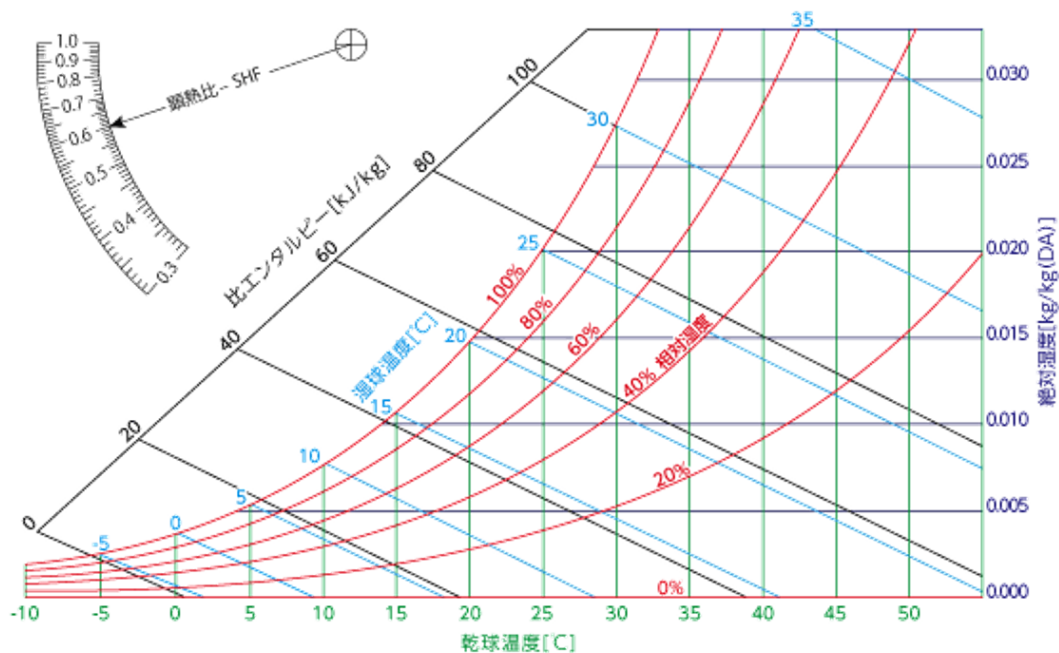


図 5.33: 湿り空気線図

さらに青木らの論文では、室内気候の実態および居室空間の温熱性能を在来型木造住宅、軽量鉄骨造住宅、RC造集合住宅、高気密・高断熱住宅型木造住宅の温度と湿度変化が調査されている [24].

今回の測定実験では、密閉時の室内から窓やドアを開閉したときの湿度変化は大きく、その理由として内外差の温度変化によって飽和水蒸気量が変化する現象が、湿度に影響していると推測した。また、風の流入により、室内の温度は変化するため、湿度変化も変化するものと、水蒸気の流出入に起因する影響も受けやすい。このように、屋外の場合、日差しや植物などの環境、風などの気圧配置の関係性が影響し、密閉時の空間と空気流入がある開放時の違いがあると立証した。

5.5 炎の動的変化を再現する疑似炎の制御

提案した疑似炎装置は、第 5.1.1 節の疑似炎発生ユニットに、第 5.3 節の外部湿度センサユニットや第 5.2.1 節の放水検出ユニットの結果を踏まえ、実装を行った。密閉した室内に窓やドアを開放した際の湿度変化を、Arduino で制御し疑似炎ユニット装置のファンの強さと LED テープライトの光源を変化させることで「酸化反応で起きる炎の光の変化」を表現した。また、燃焼実体に放水した量を距離センサでリアルタイムに計測したデータが一定値以上になった場合に LED テープライトの光源を消灯することで「冷却消火が可能な疑似炎」を表現した。

5.5.1 室内への空気流入の表現

第 5.1.1 節に記載した疑似炎発生ユニットに、第 5.4.4 節で立証した湿度変化を「酸素濃度」の変化に見立て、酸化反応で起きる炎の光の変化を表現する。

5.5.2 酸素濃度が低くなる表現

第 5.4.4 節の立証結果から、密閉室内の湿度変化は 1 % 未満であり、室内に酸素等の空気の流入がないことを示唆する。よって第 4.2.4 節の燃焼実験の結論で述べたように、空気の流入がない湿度変化の際は、二酸化炭素濃度の増加や酸素濃度の低下が発生していると判断し、炎が弱くなる表現を行う。具体的には、ファン動作を徐々に弱める事で、疑似炎発生ユニットで発生させた霧の高さを低くし、LED の輝度値を下げることで、疑似炎の光を弱くする。なお、この炎の強さは 5 段階とした。LED テープの色は RGB 値（赤、青、緑の順で 0~255 の範囲で表現したもの）を調節し変化させる、一番強い色を 255, 150, 20 とした場合、図 5.34 の左のようなオレンジ色となり、一番弱い色を 255, 30, 20 として図 5.41 の右の赤色とした。徐々に弱める速度は、1 分間を測定し、湿度変化がない場合は G（緑）を 30 下げることで、赤色に近い色に変化させていった（図 5.34）。

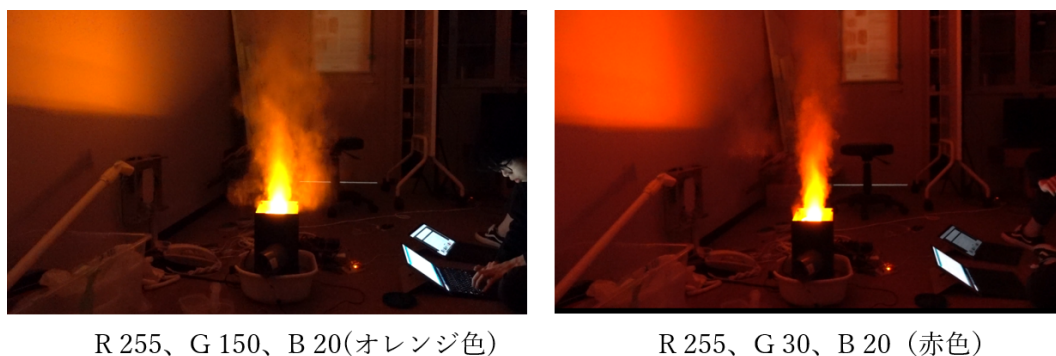
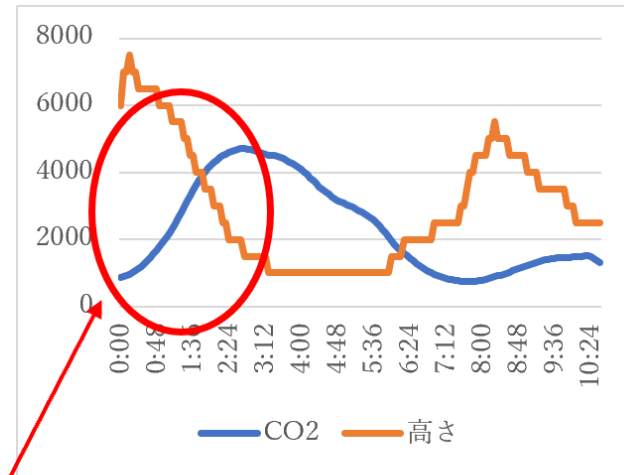


図 5.34: 酸素濃度が低くなる表現

このように、ファンの強さと色を変化させることで、炎の強さと大きさを表現することが可能となった。

なお、窒息効果でも炎は小さくなり、酸素濃度が 15 % を下回ると炎は消えるため、窒息効果による消火という表現もを行うことも考えた。しかし、消防隊による消火訓練の提案のため、消火技術の向上が求められており、放水による消火としかかったため、完全窒息による消火表現は開発しなかった（図 5.35）。

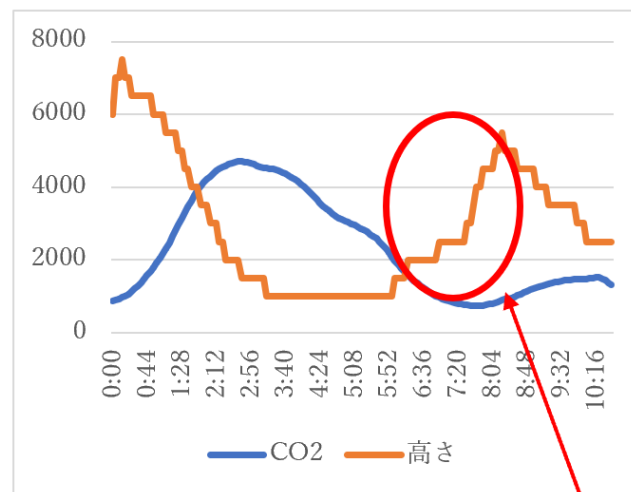


炎が弱まる表現

図 5.35: 炎が低くなる表現

5.5.3 酸素濃度が高くなる表現

第 5.4.4 節の立証結果から、空気流入による室内の湿度変化は 1 % 以上であり、湿度変化が 1 % 以上であった場合は酸素等の空気の流入があったとすることができる。よって第 4.2.4 節の燃焼実験結論で述べたように、室内に空気が流入した状態では二酸化炭素値の下降や酸素濃度の上昇が認められ、炎の高さは少しずつ上昇していく、その時のデータ処理モジュールで Arduino によりファン動作を強める事で、疑似炎発生ユニットで発生させた霧の高さを高くすることができる (図 5.36)。



炎が強まる表現

図 5.36: 炎が高くなる表現

燃焼は発光を伴うため、炎が強まる表現は光を強くする必要がある。空気の流

入が激しい時（風が強い時，同空間で2か所以上窓やドアを開放した時）は空気の流入が少ない時と比較し，湿度変化は激しく，また，窓やドアの距離が近い時は遠い時と比較し湿度変化は激しかったことから，湿度変化で1%以上2%未満の増減変化時は，5段階の内の1段階ずつ上げファンとLEDテープの色を調節し，さらに2%以上の増減変化時には，空気の流入が激しいと判断し，2段階ずつ上げ，空気の流入により，炎が大きくなる表現とした。

5.5.4 冷却消火が可能な疑似炎の表現

第5.1.1節に記載した疑似炎発生ユニットに，放水量測定装置を組み合わせることで，放水による冷却消火が可能な疑似炎を表現する(図5.37)。

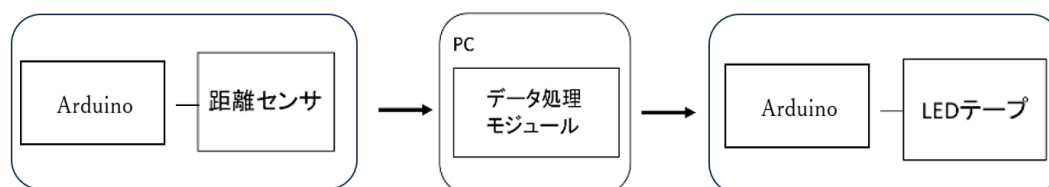


図 5.37: 冷却消火表現の構成図

5.5.5 消火表現

水は，火災に対して非常に効果的な消火方法の一つで，火災の3要素である「熱源」を取り除くという冷却作用がある。水は沸点まで加熱されると，水蒸気または蒸気と呼ばれる気体に変化しながら熱を吸収する消火特性を持つため，LEDテープの色を水蒸気の表現を入れる必要があると考えた。そこで，水をかけた場合に，図5.38(左)のような通常の状態の疑似炎を図5.38(右)のように白色に点滅させるように実装を行った。その後，一定量の水がかけられた場合に図5.39(左)のように白色に点灯してから図5.39(右)のように消灯することで，放水によって水蒸気が起こり，その後消火される様子を表現した。



図 5.38: 通常の状態の疑似炎 (左), 冷却消火中の疑似炎 (右)



図 5.39: 冷却消火がある程度なされた時の疑似炎 (左), 消火された時の疑似炎 (右)

第6章 実験

本章では、前章の実装した疑似炎デバイスを活用し、消防隊による消火訓練の実験と考察を示す。

6.1 実験目的

石川県白山市、野々市市、川北町を消防の管轄とする、白山野々市広域消防本部の消防士の協力を得て、消火訓練に使用する訓練施設で通常の訓練と疑似炎装置の比較実験を行う。

6.2 アンケート対象

白山野々市広域消防本部の消防職員 15 名に体験していただき、アンケートを実施する。

6.3 視覚的比較

6.3.1 屋外から見た夜間帯の比較

板に描いた炎と提案する疑似炎デバイスのそれぞれの夜間帯での見え方を比較をした図を図 6.1 に示す。比較する 2 つの疑似炎について、図 6.1 の左右の図それぞれにある赤丸の位置に配置されている。図 6.1(左) が板に描いた炎の様子であり、図 6.1(右) が疑似炎装置の様子である。



図 6.1: 屋外での板に描いた炎と疑似炎装置の比較

この2つの疑似炎の見え方についてのアンケート結果を図6.2に示す。図6.2(左)が板に描いた炎についてのアンケート結果であり、図6.2(右)が疑似炎デバイスについてのアンケート結果である。

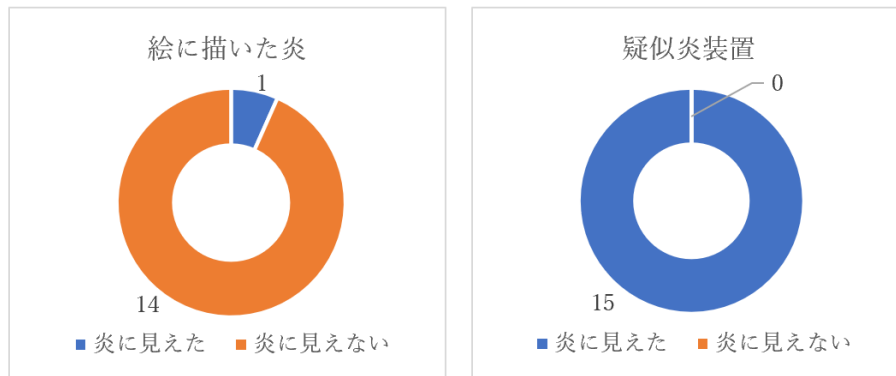


図 6.2: 屋外の疑似炎の比較アンケート

6.3.2 屋内の暗所の比較

屋内の暗所での疑似炎の見え方について比較した。板に描いた炎と提案する疑似炎デバイスのそれぞれの見え方を比較した図を図6.3に示す。図6.3(左)が板に描いた炎の様子であり、図6.3(右)が疑似炎デバイスの様子である。

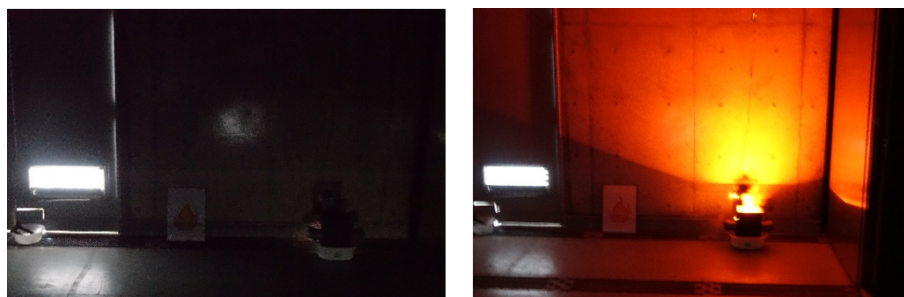


図 6.3: 屋内での板に描いた炎と疑似炎装置の比較

この2つの疑似炎の見え方についてのアンケート結果を図6.4に示す。図6.4(左)が板に描いた炎についてのアンケート結果であり、図6.4(右)が疑似炎デバイスについてのアンケート結果である。

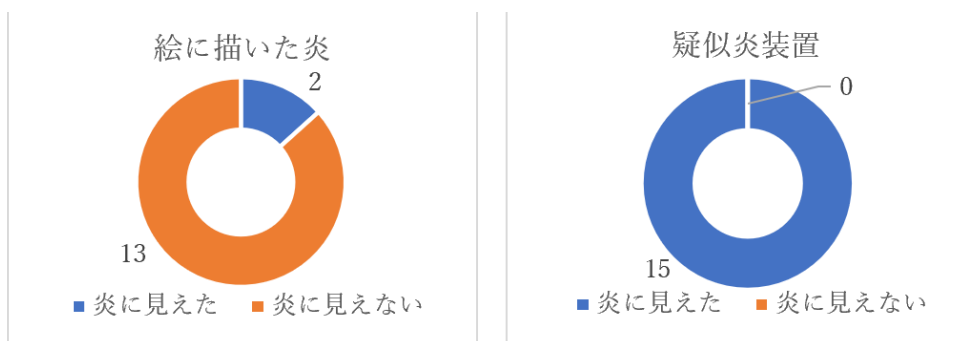


図 6.4: 屋内の疑似炎の比較アンケート

6.3.3 明所と暗所の視覚的比較

板に描いた炎と提案する疑似炎デバイスを明所と暗所での比較を行った時の様子を図 6.5 に示す。図 6.5(左) が明所での 2 つの疑似炎の見え方の様子である。また、図 6.5(右) が暗所での 2 つの疑似炎の見え方の様子である。



図 6.5: 明所と暗所の視覚的比較

明所と暗所の 2 つの条件で提案した疑似炎デバイスが炎に見えるかをアンケートした結果を図 6.6 に示す。図 6.6(左) が明所でのアンケート結果であり、図 6.6(右) が暗所でのアンケート結果である。

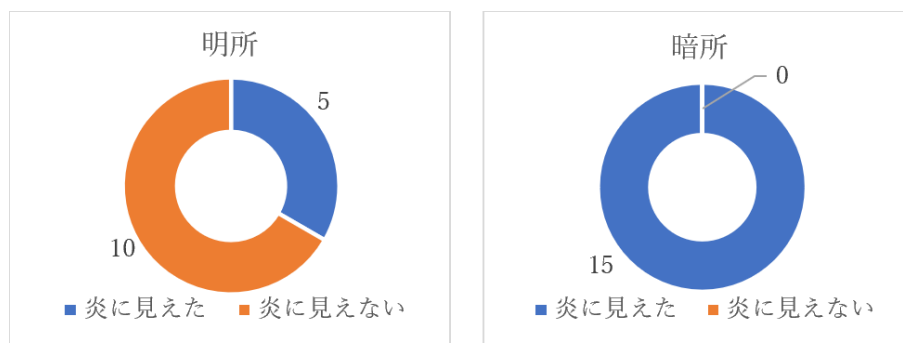


図 6.6: 提案した疑似炎デバイスが明所と暗所のそれぞれで炎に見えるかをアンケートした結果

視覚的比較コメントは以下のとおり

- Aさん 明るい場所では、板に書いた炎のほうが見えたが、暗い場所では板に書いた炎は見えにくい、疑似炎装置ははっきりと見えた
- Bさん 炎の動きがリアルで延焼しそうな感じでよかった
- Cさん リアル感があって、炎の可視化は必要と感じた

6.3.4 消火訓練の炎可視化について

消火訓練において炎が消える表現が必要かということについてアンケートをした結果を図 6.7 に示す。

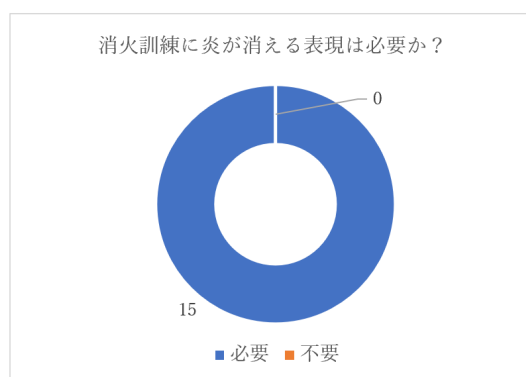


図 6.7: 消火訓練に炎が消える表現が必要かをアンケートした結果

消火訓練に消える炎の表現は必要かのアンケートに対し、15人全員が必要との結果となった。

コメントは以下のとおり

- Aさん 活動隊の中で炎の共有ができる

- Bさん 消火できることによって放水を止める判断ができる
- Cさん 消火効果を評価できた

6.4 疑似炎装置を活用した消火訓練

白山野々市広域消防本部，消防訓練塔を使用し消火訓練を実施する．消防訓練は1階の室内に疑似炎装置を設定し，火災想定訓練を実施した．

6.4.1 疑似炎装置を活用した火災想定

今回の消火訓練における火災想定図を図6.8に示す．今回の訓練では疑似炎装置を設置した室内に，訓練者が入り放水を行うものである．

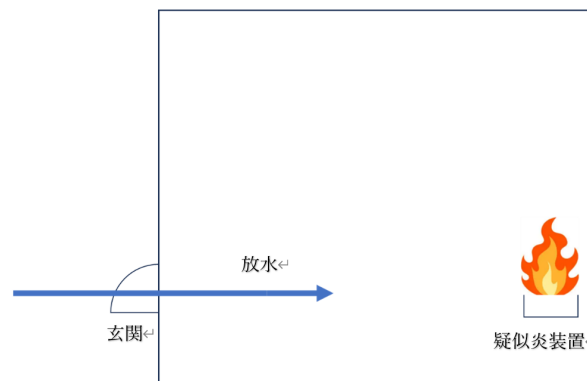


図 6.8: 火災想定図

実際の訓練の様子を下記に示す．図6.9は玄関から疑似炎装置を見たときの状況である．図6.10は訓練中の疑似炎装置への放水状況である．図6.10(左)が密室の状況であり，図6.10(右)がドアを開き放水員が放水している状況である．図6.11は玄関から疑似炎装置へ放水しているときの状況である．図6.12は実際に疑似炎デバイスに放水を行い消火しているときの状況である．図6.12(左)は水蒸気の状況であり図6.12(右)は消火した時の状況である．図6.13は放水員が消火を確認し自ら放水を停止した状況である．



疑似炎装置

図 6.9: 活動中の隊員が玄関から疑似炎装置を見た状況

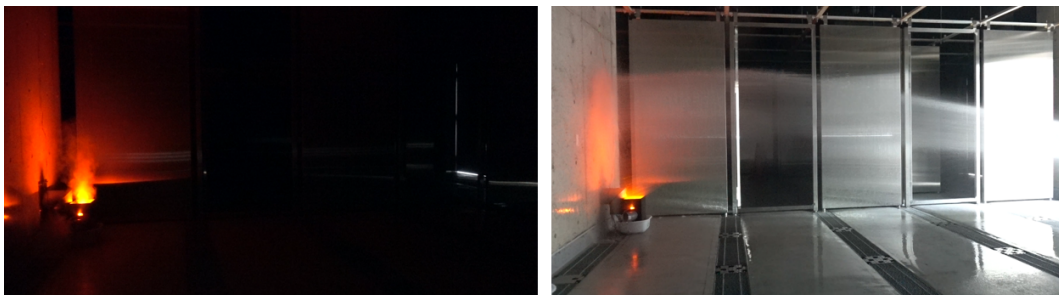


図 6.10: 訓練中の疑似炎装置への放水状況



図 6.11: 活動中の隊員が玄関から見た疑似炎装置への放水状況



図 6.12: 訓練中の疑似炎装置消火状況



図 6.13: 活動中の隊員が放水を停止した状況

6.4.2 火災想定者の必要性

板に描いた炎を用いた訓練と疑似炎装置を用いた訓練における必要とされる火災想定者の数をアンケートした結果を図6.14に示す。図6.14(左)が板に描いた炎でのアンケート結果であり、図6.14(右)が疑似炎装置でのアンケート結果である。

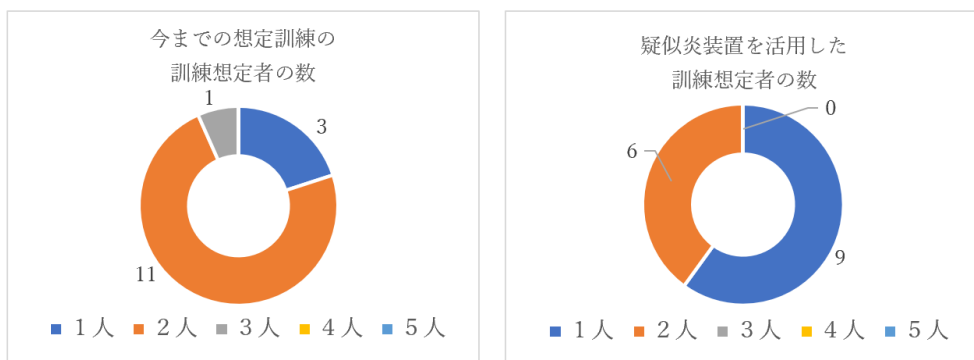


図 6.14: 必要とされる火災想定者の数

6.4.3 フィードバックの有効性評価

板に描いた炎を用いた訓練と今回の疑似炎装置を用いた訓練における訓練終了後のフィードバックの有効性についての有無をアンケートした結果を図 6.15 に示す。図 6.15(左) が板に描いた炎でのアンケート結果であり、図 6.15(右) が疑似炎装置でのアンケート結果である。



図 6.15: フィードバックの評価

6.4.4 放水員の判断

板に描いた炎を用いた訓練と今回の疑似炎装置を用いた訓練における水の放出や消火完了の確認など放水員の判断の有無をアンケートした結果を図 6.16 に示す。図 6.16(左) が板に描いた炎でのアンケート結果であり、図 6.16(右) が疑似炎装置でのアンケート結果である。



図 6.16: 放水員の判断

6.4.5 火災現場の表現に近い訓練

板に描いた炎を用いた訓練と疑似炎装置を用いた訓練で火災現場の表現に近い訓練であるかをアンケートした結果を図 6.17 に示す。図 6.17(左) は板に描いた炎でのアンケート結果であり，図 6.17(右) は今回の疑似炎装置でのアンケート結果である。

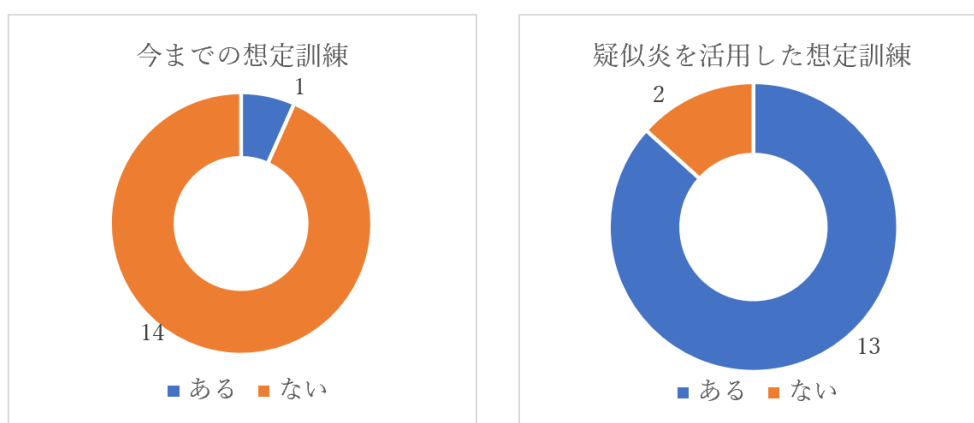


図 6.17: 火災現場の表現に近い訓練

6.5 本実験の考察

本節では前節で得られた実験結果から考察を示す。

また，第 2.1.1 節の静的な疑似炎の課題をアンケート結果から考察し，さらに，消防職員の立場から見た目的の妥当性などの観点から，提案デバイスの消火訓練に対する有効性を探る。

6.5.1 動的な疑似炎の可視化

消火訓練は長年、板に描いた炎や煙のような静的な疑似炎を判断して放水する訓練が続き、現在も主流となっている。このような表示では視覚的に火災の状況を判断できない訓練となるため、訓練の火災想定を事前に付与し、活動隊員にイメージを持ってもらう想定訓練が多い。そのため、現場ではその場の火災状況を判断する必要があるのに対し、想定訓練では現場到着前に活動の「固定観念」や「決めつけ」をしてしまう場合が多々ある。

しかし、この疑似炎装置を活用すれば、活動隊が「見た状況」で判断して消火活動を行うため、「固定観念」のようなバイアスがなくなり、実火災に近い状況をシミュレーションすることが可能である。

6.5.2 火災想定者

アンケート結果によると、消防隊1隊のみの想定訓練であれば、今までの訓練は火災想定者役として想定者、通報者、通信指令課役を、消防隊の訓練サポートに付き添う必要性があることを確認した。一方で、疑似炎装置であれば、「見た状況」で判断が可能となるため火災想定者は不要となることがわかった。よって、通報者と通信指令課役の多くて2名のみの火災想定者役となり、また通報者が通信指令課役を兼任することも可能であり、最低1名でも訓練が行えることとなる。

このことにより、当日の災害実働者全員が消火訓練を行える環境となり、疑似炎装置によって火災想定者の削減と、当日の災害対応者が訓練に参加できる環境が可能となった。

6.5.3 消火訓練後のフィードバックの有効性

以前までの消火訓練は、消火するまでの吸水操作やホース延長、適切な放水方法のように活動隊員の消防機器取扱いの習熟訓練に留まることが多かった。その理由として、同じ火災状況のイメージを火災想定者や各隊員が共有できていないことが挙げられる。なぜなら、火災状況は火災想定者の言葉のみによって共有されるため、各自の主観的な「決めつけ」や「固定観念」のバイアスを受ける。その結果、客観的なフィードバックを与えても、隊員各自の想定とは食い違う可能性が高いため、あまり大きな意味をなさないと考えられる。

そのため「火災想定者」から見た、吸水操作やホース延長などの、消防器具取扱いが適切に実施されたかのフィードバックしかできないことが長年続いたことで、消火訓練は消防機器取扱いに対して「指摘を受けない活動」を目指す訓練となっている。この疑似炎装置では、「酸化反応で起きる炎の光の変化」と、「冷却消火が可能な疑似炎」をリアルタイムに再現可能とし、消す、消えることが可能な湿度センシングに着目した消火訓練用疑似炎デバイスを提案しているため、活動隊の

消火は装置のセンサが反応したものとなる。よって「立証」している炎の状況に対し、行った活動の「評価」ができることは、フィードバックする人が消防機器取扱いに対してのフィードバックから、「火災を評価し適切な消火活動」のフィードバックへ変化することが可能となり、現場のための訓練に繋がると考える。

このように、疑似炎装置を活用した想定訓練は、消火活動隊に対してフィードバックを適切に行える結果となった。

6.5.4 放水員の判断

今までの消火訓練では、視覚的に変化する動的な炎ではなく、板や布に描いた静的な炎に対して放水を行っていたため、何が効果的な放水かを判断することができなかった。そのため放水員の判断で放水方法を選択することはできず、ただ放水するために機材を扱う訓練になっていた。

こういった背景から、消火訓練の炎可視化についてのアンケートやコメントの結果では、炎の可視化が可能である疑似炎デバイスを必要だと評価する声が多かった。また、実際に疑似炎デバイスを用いた消火訓練を行った放水員からは以下のコメントを受け取った。

- Aさん 炎の大きさを判断して適切な放水方法を選択できる
- Bさん 炎の強さからどこに放水するかを意識した
- Cさん 放水を止めるタイミングを自分で判断できるようになった

これらの結果から、疑似炎デバイスを用いることで、炎の大きさ、強さ、また、消火の効果を放水員が判断できるようになり、有効的な消火訓練を実施できると考えられる。

6.5.5 訓練における臨場感

本研究で実装した疑似炎デバイスを用いた訓練を行い、本デバイスや訓練に関してアンケートを取った。その結果、疑似炎デバイスを用いた訓練が火災現場に近い訓練であるとして、提案デバイスの有効性の高さを示す結果となった。この結果の大きな要因として視覚的な炎の再現や酸素濃度で変化する炎の再現、放水による消火の再現が可能であることが考えられる。特に、酸素濃度で変化する炎の再現は非常に重要である。実際に、消火活動の際、燃焼実体になるべく「空気」を送り込まない対応をしながらの活動は重要とされている。

例えば、糸魚川市大規模火災がその1つである。平成29年版の消防白書にあるように、平成28年に発生した新潟県糸魚川市のラーメン店における火災は焼損棟



図 6.18: 新潟県糸魚川市の大規模火災（提供：平成 29 年度 消防白書）

数 147 棟にも及んだが [27], この大火の特徴は, 強風により空気の流入が激しく, 火災の発達が速まってしまったことが原因である (図 6.18).

また, この大火のように, 強風のような気象条件では空気の流入が激しく, 爆発的な火災の拡大に繋がるため, 消火隊の活動は常に空気の流入を考慮した活動で, 風上や風下を考慮し消火にあたる必要がある [27].

この疑似炎デバイスも風が強い日には湿度変化も激しく, 無風に近い時には湿度変化は強風と比較し平坦な状況となる. さらに, 開放した窓やドアの位置は離れた場所と近い場所では湿度変化の状況も変化する. 疑似炎デバイスが同一の訓練場で使用しても, 天候の違いや, 疑似炎デバイスの配置位置により, 風下からの消火や, 消火方法は, 当日の状況によって違うため, 同じ疑似炎デバイスであっても, 1つのパターン化した訓練に留まることはない.

また, 霧の大きさや, 輝度の段階的な変化により「炎の強さ」も表現可能としたことで, 放水員が炎の「強さ」を評価し, その部分に注水を心がける意識づけも可能となっている. 「冷却消火が可能な疑似炎」は燃焼実体に放水した量を, 装置内に設定した距離センサでリアルタイムに測定し, LED テープライトの光源の強さや色を変化させることで表現可能とした. 現在利用されている消火判断を放水員が把握できる消防職員用消火ディスプレイは, 第 3.3.2 節に記載している, 「火点」の的が倒れる消火表示しかない.

また, 疑似炎デバイスでは, 燃焼物に水が当たった時に必ず発生する水蒸気の表現を, LED テープライトを白色に変化させることで表現した. このことにより, 水蒸気の表現が放水員に対し燃焼実体に水が当たっていることを評価可能となり, また放水した量をリアルタイムに測定し, LED テープライトの照明を消灯することによって, 完全消火に至ったことを放水員自らが判断できることが可能となった.

このように「酸化反応で起きる炎の光の変化」では, 「空気の流入」による「炎の大きさと光の強さ」の表現, 「冷却消火が可能な疑似炎」では, 放水により燃焼実体に当たることで「水蒸気の発生」と, 「消火」の表現が可能となった. これにより, 現在の動的な疑似炎デバイスの, VR, プロジェクションマッピングの課題は解決され, さらに現行の LED を用いた特殊照明疑似炎演出装置と比較し, 酸化反応による表現と消火要素を入れた革新性の高い疑似炎を提案することができた.

しかし、「さらに大きな炎の表現を求める」といったコメントもあった。

6.5.6 消防職員の問題

現在の消防職員に求められていることを、令和5年3月に総務省消防庁は「救助人材育成ガイドライン、救助訓練指導マニュアル」の報告書をまとめ報告している [28]。

以下の文を消防本部からのヒヤリング、全国消防救助シンポジウム記録集から引用する。

(前略) このような状況が変わる中、人材育成について以下のような課題やニーズが増加している。

<課題>

- 職員の大量退職に伴い技術や知識の伝承が滞る懸念
- 火災件数も減少傾向にあり、災害現場経験の少ない若手職員が増加
- 多岐にわたる業務による訓練時間の減少
- 自発的でなく、指示待ちの隊員がいること
- 指導者によって指導方法が違うこと

<ニーズ>

- 若手隊員への知識、技術の伝承を見える化したい
- 経験値に頼ることなく災害活動能力を向上する訓練、研修を充実させたい
- 初動対応、戦術等を自ら考える機会を作りたい
- 限られた時間の中で効率的な訓練手法を取り入れたい

こうした課題やニーズは全国の消防本部の救助隊及び救助隊員に共通しており、個々が悩みながら様々な検討を試みているものの、効果的な手法や適切な改善策を見出すことは難しい状況である。また、消防本部によっては、本部内で救助人材に関する教養や研修（新隊員教養、救助隊長研修等）を実施するなど独自の取り組みを確立しているところもあるが、政令市などの大規模消防本部や中核市の一部の消防本部に限られており、全国的には、業務の多様化や新型コロナウイルス感染症等による人員と出動態勢の確保が優先とならざるを得ず、組織的かつ具体的な「人づくり」に関する支援策の推進や体制構築に苦慮している消防本部が多いのが現状である。

消防職員としての課題やニーズに対応するには、実践的で効果的な訓練手法が必要であり、自らが体験し戦術を作り出す環境を作り、「考える消防士」を一人でも多く作り出すことが今後の課題と考える。

6.5.7 建物の変化

建物の変化は、ひと昔前では木造建築が多く、耐火性能も整ってはなく、隙間風も入る構造であった、つまり、火災の3要素の「酸素」が自然に室内に入る環境と、木材であるため燃焼が速く、消防隊が到着した時には火災最盛期の状況が多かった。

しかし、現代の住宅では高気密高断熱住宅 [29] が健康上の理由や、地球温暖化の環境変化でより良い生活環境とすることで増え続けている。この高気密高断熱住宅は、密閉率が高く酸素が入る隙間が少なくなり、火災最盛期は消防隊の到着後となる可能性は高い。

このように、近年の住宅火災は消防隊が到着する時期によって、活動は様々な事を予測する必要がある。考えずに屋内進入すると、酸素流入によって燃焼を拡大させる恐れがあり、フラッシュオーバー [10] やバックドラフト [11] のような危険となる現象が起きる可能性が高く、その現象により活動している隊員は負傷もしくは殉職する恐れが高い。

6.6 訓練計画，実施体制の妥当性

消防法第1条（目的）には、「この法律は、火災を予防し、警戒し及び鎮圧し、国民の生命、身体及び財産を火災から保護するとともに、火災又は地震等の災害による被害を軽減するほか、災害等による傷病者の搬送を適切に行い、もつて安寧秩序を保持し、社会公共の福祉の増進に資することを目的とする」と記載されている。つまり、火災発生以前の一般的な防止対策や措置、また災害が予想される場合の事前措置、さらに火災発生後、再燃が起きないように制圧する必要がある。さらに火災からは国民の命と身体、財産を守ることを優先することと謳っており、消防職員に課せられた使命をこの第1条で述べている。

この使命のためには、火災予防のための立入検査や防火指導、また業者が確認してきた火災予防の書類審査、当然災害対応を職務としており、多岐にわたる業務の中で訓練を実施しなければいけない。また、現行の訓練では消火訓練を行う際、想定を事前に確認し、火災想定者がフィードバックを行うが、上司が想定を出すことが多く、災害対応の指揮を執る上司が、消火訓練に参加できないことも多い、このように時間制限の中で、本来指揮を執るべき人が訓練を行わない環境は、訓練のための訓練になることが多く、現場のための訓練を実施することが必要なことに対し能率的、効率的に悪い状況となることが多い。

開発した疑似炎装置は試作した装置はまだ1台で、「たばこ火災」のような「ぼや火災」の表現にとどまるが、数を増やし空間中に多数配置することで大きな炎を再現可能になると考え、複数台運用のために今後も試作を進める必要がある。しかし、令和3年の主な出火原因別出火件数では、たばこ火災が最も多く(図 6.19),

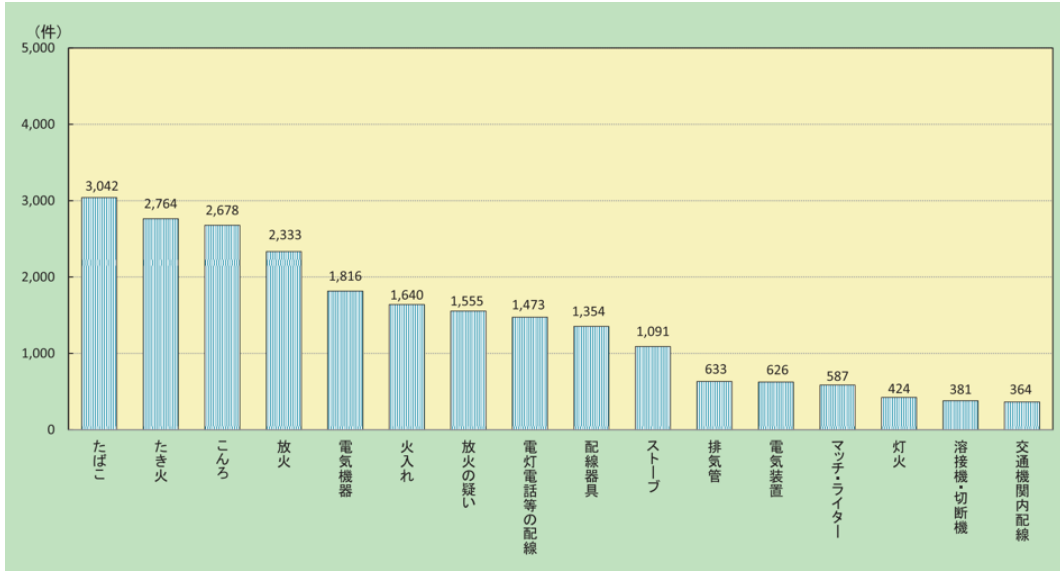


図 6.19: 出火原因別出火件数 (提供: 総務省消防庁 消防白書)

また、たばこによる火災の損害状況では、建物火災が最も多く、次いで車両火災となり、たばこ火災は建物で発生しやすい想定といえる(図 6.20).

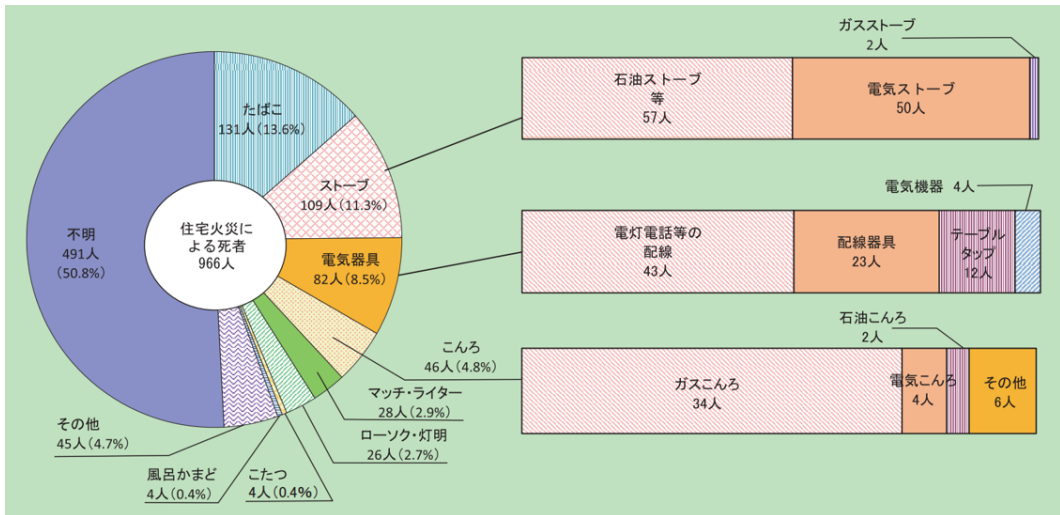


図 6.20: 建物火災原因 (提供: 総務省消防庁 消防白書)

よって、現在の疑似炎装置の大きさでも、出火原因が最も高い可能性のたばこ火災の訓練を想定として実施することは非常に重要であり、現行の疑似炎装置でも実現が可能である。

第7章 結論

消防隊による消火訓練は、消防隊員であれば多くの人が体験したことがあるだろう。しかし、これまでの消火訓練は静的な炎を活用したものであった。動的な炎の可視化は、VRやプロジェクションマッピングでは消防機器が使用できないことや、放水した水に対して反応しない等の問題がある。また、霧にLEDライトを照射した動的な疑似炎では、炎の強弱や消火表現は手動で調節するもので、「酸化反応で起きる炎の光の変化」と「冷却消火」が実現できる表現はなかった。

以上から、「消す」「消える」ことが可能な湿度センシングに着目した消火訓練用疑似炎デバイスは、室内の消火を行う際の室内の湿度センシングに着目した。窓やドアの開閉によって起こる空気流入を考慮し、燃焼時の助燃材である「酸素」によっておこる燃焼変化と、燃焼実体への放水量を測定し、冷却消火が可能な疑似炎デバイスを提案した。本研究は実装した提案疑似炎デバイスを用いた消防隊による消火訓練実験を行い、提案デバイスの消火訓練に対する有効性を探った。

特に本研究では、Human-Computer-Interaction 分野における次のような課題を解決できたといえる。

1. 湿度センシングに着目した新しい疑似炎デバイスの提案

数回の室内湿度測定によってアルゴリズムを検出し、湿度センシングによって空気流入判定を可能とした。

2. 新しい疑似炎デバイスの下記3つの機能の試作開発

(a) 視覚的にリアリティのある疑似炎の実装

生成した霧に対してファンの風により発生させた霧が上部に整流され、上部に上がった霧に対しLEDの光を照射したことにより、炎心、内炎、外炎の炎が可視化が可能となり、動的な立体感のある疑似炎の実装を行った。

(b) 湿度センシングに着目した炎の勢いの動的変化を再現する機能の実装

湿度センシングにより室内への空気流入検出値を測定し、その検出値からアプリケーションを開発し燃焼の強弱変化実験を行った。

(c) 直接放水による炎の勢いの衰えおよび消火を再現する機能の実装

疑似炎デバイスに放水した水量をリアルタイムに測定し、検出した測定データを用いたアプリケーションを開発し、消火表現の実験を行った。

3. 試作疑似炎デバイスを実際に用いた消防隊による消火訓練実験による提案デバイスの有効性の検証

静的な炎では不可能であった消火訓練の検証により、リアルタイムにセンシングした試作疑似炎デバイスの有効性を検証した。

「消す」「消える」ことが可能な湿度センシングに着目した消火訓練用疑似炎デバイスによって、視覚的に共有できる動的な立体感のある疑似炎により、火災想定者を減らすことが可能となる。消防職員は常に災害が発生し出動しなければならない環境の中、疑似炎装置を活用した消火訓練では、延焼する心配がないため、消火をしなくても災害に対応することが可能となった。また、失敗の許されない消防現場での状況を、効果の高い疑似炎装置により、訓練で試すことができるようになる。つまり、新規の消火方法が生まれやすい消火訓練環境になると考える。さらに、経験豊富な隊員の消火する際の判断を伝えることで、適切なフィードバックにより次の災害現場に繋がる訓練が可能となるだろう。

今後の問題として、密閉率の高い高断熱・高气密住宅が増え続け、冷却消火を主とした戦術としていた消火活動に、窒息消火も考慮しなければいけない時代への変化に対応する必要がある。毎年災害件数が減少し経験数が減る中で、消防職員は刻々と変化する現場に対応し、的確な状況判断ができるように効果的な訓練を積み重ね、考えながら消火することが重要となるだろう。

第8章 今後の展望

人口減を迎えるわが国では、人手不足が現実の問題となっており、業種や職種によってはAI活用が進められているが、一方で消防業務は、AIには決してとって変わることのできない現地、現人の任務 [30] であり、効率的な消火や救助、救急活動中に自身の安全の確保を確実にするうえで隊員に求められるのは、状況や気象、傷病者の容態、時間や人員などの様々な状況を判断し、先読みし、適切にチームで共有し、躊躇なく意思決定して行動するための高い現場力があるといえる。

また石川県の白山市、野々市市、川北町を管轄とする白山野々市広域消防本部の過去5年間の火災状況を見ても、出火件数で年間30件を超えた年は1年だけであり、また建物焼損棟数で、全焼の火災は最大で12棟である(図8.1)。

過去5年間の火災状況

区 分	平成29年	平成30年	令和元年	令和2年	令和3年	平均
出 火 件 数 (件)	22	31	21	29	23	25.2
建物 火 災	13	19	13	15	19	15.8
林 野 火 災		1				0.2
車 両 火 災	5	6	6	3	1	4.2
船 舶 火 災						
航空機 火 災						
その他 火 災	4	5	2	11	3	5.0
建 物 焼 損 棟 数 (棟)	23	19	17	19	42	24.0
全 焼	7	1	3	5	12	5.6
半 焼			2	1	1	0.8
部 分 焼	8	3	1	6	14	6.4
ぼ や	8	15	11	7	15	11.2

図 8.1: 消防職員数 (提供：令和4年度 消防白書)

令和3年の白山野々市広域消防本部の職員数 [31] は221人で、実火災の建物火災に対し、放水を行った職員は限られ、火災経験が少ない職員が多いといった現状である。

このように消防職員の増加はあるものの、実際の火災現場は年々減少傾向にあり、火災の経験が豊富な職員は今後ますます減る傾向にある、そのため、総務省

は DX の共有で消防体制の強化を期待しているが、実際の消防職員が行う消火訓練は、普段から活用している資器材を使い慣らし、特徴を掴み、現場で活かせるように日々訓練をして習得する必要があることから疑似炎のような新規訓練手法が重要となる。

以上を踏まえて、この疑似炎装置を活用した自動化、手動化、一般市民用の観点から今後の展望を考える。

8.1 自動化

開発した疑似炎装置は湿度センサにより「酸素濃度」の変化を表現し、距離センサで放水した水量を測定することで「消火」の表現を可能とした。これは消防隊の活動を、疑似炎装置が反応したセンサにより自動化にしたこととなる。このメリットは、酸素濃度の変化により炎が大きくなる場合は、消防隊の活動で空気流入の制御ができていないことを示し、活動隊自身が燃焼を促す行動をさせてしまった結果を客観的に評価できるため、疑似炎装置の自動化はフィードバックで反省すべきことを数値的に受け入れることに繋がりやすい。自隊の活動の結果は、疑似炎の自動化である新規訓練手法の提示としては現場に反映できると考える。

今後は酸素濃度を 15 % 以下になると窒息効果で消火となる表現の実装を行いたい。そうすることで、さらなる消火方法も生まれる可能性は高いと考える。

8.2 手動化

消火訓練想定は想定外の延焼することも必要と考える。その理由として、災害現場は何があるかわからない。理論を超えた現象が起きたとしても理解し対応する必要がある。例えば自宅の室内には様々なものが置いてあることは想像できる、そこにはテーブル、椅子、カーテン、電化製品などがあり、その中でもポリエチレンやアクリル等で作られた製品は燃えやすく、燃焼すると原料は石油製品であるため、油に火が着くといった現象が起こる。そのため、室内の燃焼は様々な現象が起きる事があり、常に想像した火災燃焼過程どおりにいかないこともある。その中で消防隊は人命救助を最優先とし、早期鎮圧、鎮火に尽力を注ぎ、延焼をさせない活動が重要である。また、火災現場では危険なものがあると認識を持ち活動しなければ、自信過剰となり危険を顧みず活動してしまい命を落としてしまう可能性が高くなる。自動化でも有効性は高いと推測するが、手動で想定者が延焼状況を刻々と変化させることを訓練者に与えても、現場と訓練がかけ離れることはない。よって、訓練で容易に消火できるといった意識をもたせないことも重要となるので、手動により、危険性が高い状況をあえてできるようにすることも、消防訓練では重要と考える。この疑似炎装置では、視覚的に現在の訓練よりも現実感のある状況となるので今後の展望としても期待は高い。

8.3 一般市民用

疑似炎装置は、一般市民用の効果も高いと考える。疑似炎装置によって、「安全に炎の特性を理解できる」という新しい体験を届けることが出来た。そのことから、職場や家庭で、この体験と共に炎の特性を知り、消火の特性を知ることができるとは重要だと考える。職場では、特定の建物の大きさであれば、消防訓練を年2回義務としている、この消防訓練は消火訓練、避難訓練、通報訓練があり、実際の建物で消火訓練をできるようになれば、初期消火の初動訓練をリアルに体験できること、有事の際に迅速に行動することができるようになる。さらに、発煙筒は最近煙からライトに変化している、その理由としてトンネル内の発煙筒は、煙によって視界が妨げられることが理由とされているが、ライトでは日中の時間帯は視認性が落ち、立体感に欠け安全面は低下する。この疑似炎装置を小型化にし発煙筒の大きさに変化することができれば、日中の時間帯であっても光の色を変化させ、視認性をよくすれば、煙と違い安全性は高まり、発煙筒の代わりに疑似炎を使うことで効果はさらに高くなると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、学生の年齢の娘が2人いる中、北陸先端科学技術大学院大学で社会人学生として学ばせてほしいと妻に要望し、授業料の工面をし、私の背中を押してくれた妻に感謝します。

さらに、社会人学生として本学に入学し、研究ができる環境を提供していただいた北陸先端科学技術大学院大学にも感謝します。私が入学したのは新型コロナの時期でもあり、救急隊として働き、傷病者に感染させないことが重要な立場の救急救命士の私が、私生活において人との接触をなるべく避ける状況の中、様々な講義でオンライン対応、また、メールを活用し足りない部分を補う柔軟な対応をしていただき、講師の方々に感謝します。

研究テーマを最初に相談したのは、北陸先端科学技術大学院大学、先端科学技術研究科の日高昇平准教授でした。消防士である私が仕事では解決できない悩みを相談した事がきっかけで、大学院で解決してみてもどうかと教えていただいたことで、その時に紹介していただいた先生が佐藤俊樹准教授です。私の悩みを真剣に聞いてくれたことが始まりだったと思います。日高先生や佐藤先生から、色々な話の中で研究の楽しさが伝わり、私も研究してみたいという気持ちになり、気付けば北陸先端科学技術大学院大学で社会人学生として入学していました。新しい考え、また大切な人を紹介していただき感謝します。

佐藤准教授は、私の業である「消防」という職種を理解し、変則的な時間での学業研究に柔軟に対応していただいたこと、また、「消防」を研究テーマとしたために、専門的知識を様々な観点で調査し、私の知らない知識や技術を終始熱心なご指導とご鞭撻をいただき教えていただいたことを心から感謝の意を表します。先生とは私生活からもお付き合いをさせていただき、私生活の他愛もない会話から様々な発想と可能性を見出すことができたことは、私の人生の中で貴重な時間となりました。

消防士で生活をしていた私が、市民心肺蘇生普及啓発用 VR シミュレーターで総務省消防庁が企画する「令和3年度、消防防災科学技術賞、消防職員・消防団員等の部/消防防災機器等の開発・改良。優秀賞」や、「消す」「消える」ことが可能な湿度センシングに着目した消火訓練用疑似炎デバイスで「2023年度 Matching HUB Business Idea Plan Competition , 最優秀賞, ISICO 賞, JBMC 実行委員会賞, 北陸電力グループ賞」を受賞し素晴らしい評価を受けれたこと。普通に消防業務をしていた私が立てない場所に立って発表できたことは、私一人では実現できなかったことだと思います。先生の出会いが私の人生を変えてくれたと思って

います。

さらに佐藤研究室の仲間である橋本君には、研究テーマのプログラミングを担当していただき、私の苦手な分野を担当していただいたことで、研究テーマである、疑似炎を動作可能にさせていただけたこと。さらに、佐藤研究室の諸先輩方、同級生の原田君、甲斐君、西村君、M1の後輩諸君は研究テーマのブラッシュアップを一緒にしていただき、私の研究テーマをさらに良くしていただいたことを本当に感謝します。

副テーマでは、郷右近准教授とともに、ドローンを活用した新規水難救助手法の提案として総務省消防庁が企画する「令和4年度、消防防災科学技術賞優秀賞、消防職員・消防団員等の部/消防防災科学論文、奨励賞」を受賞できたことも心より感謝します。

私は人に恵まれていると思い、これまでの人生を歩んできましたが、大学院生活では大変な事が多かったですが、今思い返せば笑える事になっています。私が大学院で研究した数々のものが、今後の消防業務内容の変化に繋がることを心から祈っていますし、また、私もそのために今後努力したいと思っています。

参考文献

- [1] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 サイズアップ P120. イカロス出版株式会社, 2020.
- [2] 奈良松範. 火災が環境に及ぼす影響評価-発生ガスと地球温暖化. 地球環境シンポジウム講演論文集, Vol. 12, pp. 301-305, 2004.
- [3] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 ファイヤートライアングル P8. イカロス出版株式会社, 2020.
- [4] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 燃焼範囲 (燃焼限界) P23. イカロス出版株式会社, 2020.
- [5] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 燃焼 P6. イカロス出版株式会社, 2020.
- [6] 消防大学教科書. 消防訓練 第1章第2節 訓練の種別 P4-5. 一般財団法人全国消防協会, 2013.
- [7] 消防大学教科書. 消防訓練 第1章第1節 訓練の目的 P1-3. 一般財団法人全国消防協会, 2013.
- [8] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 ベンチレーション P81. イカロス出版株式会社, 2020.
- [9] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 酸素供給源 P12. イカロス出版株式会社, 2020.
- [10] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 フラッシュオーバー P45-46. イカロス出版株式会社, 2020.
- [11] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 バックドラフト P47. イカロス出版株式会社, 2020.
- [12] 総務省消防庁. 消防白書 令和4年版 消防職団員の活動 P120. 総務省消防庁 刊行物, 2023.

- [13] 東京消防庁 VR 防災体験車. VR 防災体験車. 東京消防庁<組織・施設><VR 防災体験車の概要> (tokyo.lg.jp), 2023.11.
- [14] ニュージーランド消防庁 (NZFS). 火災体験動画 VR. 今すぐ自宅から脱出せよ! 8万人超がシェアしたニュージーランド消防庁のリアリティ溢れる VR 体験 — PR EDGE, 2023.11.
- [15] Helen V. Diez, Sara García, Andoni Mujika, Aitor Moreno, and David Oyarzun. Virtual training of fire wardens through immersive 3d environments. In *Proceedings of the 21st International Conference on Web3D Technology, Web3D '16*, p. 43–50, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [16] 株式会社アイデアクラウド. 防災 VR/AR. <https://ideacloud.co.jp/>, 2023.11.
- [17] 大阪市消防局. 大阪城でプロジェクションマッピング活用の消防訓練. 大阪城でプロジェクションマッピング活用の消防訓練 | NHK 関西のニュース, 2023.3.
- [18] 能美市消防本部. プロジェクションマッピングを使用した防ぎょ訓練. 編集発行石川県消防長会事務局, 2023.1.
- [19] A-FIRE. 触っても熱くない炎がスゴイ/疑似炎の Water Vapor Fireplace が革命的. 触っても熱くない炎がスゴイ / 疑似炎の Water Vapor Fireplace が革命的! | バズプラスニュース (buzz-plus.com), 2019.5.
- [20] Duc Quang Nguyen. *Physically based modeling and animation of fire*. ACM Transactions on Graphics, p721–728.
- [21] 消防大学校教科書. 消防訓練 第1章第1節 消防訓練 P13-16. 一般財団法人全国消防協会, 2013.
- [22] 真下 薫雄・武田 松男・大神田郁夫. 小区画質の火災性状—実大火災実験. 消防科学研究所報, Vol. 30, , 1993.
- [23] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 放水要領 P61.62. イカロス出版株式会社, 2020.
- [24] 須藤 千春青木 哲. 室内気候の実態および居住空間の温熱性能評価. 日本生気象学会, Vol. 38, No. 3, pp. 71–88, 2001.
- [25] 祖父江信夫, 加藤幸一, 都築一雄, 武村富男. 屋内外温湿度の回帰分析による木造住宅の屋内気候の検討. 日本材料学会, Vol. 32, No. 359, pp. 859–863, 1983.
- [26] 土屋喬雄, 神谷昭範. 見えるかによる夏型結露の徹底検証. 日本木材保存協会, Vol. 47, No. 4, pp. 162–171, 2021.

- [27] 総務省消防庁. 消防白書 平成 29 年版 特集 2 糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方 P10. 総務省消防庁 刊行物, 2017.
- [28] 総務省消防庁. 訓練効果を高めるための救助訓練指導マニュアル. 総務省消防庁、検討会, 2023.
- [29] 株式会社 RightRescue. 消火戦術理論 火災現象 近年の建物事情に伴う影響 P51-54. イカロス出版株式会社, 2020.
- [30] 三輪卓己. It・ai の進歩による仕事と働き方の変化. 日本経営学会, 日本経営学会誌, No. 44, pp. 72–81, 2020.
- [31] 白山野々市広域消防本部. 白山野々市広域消防本部 令和 3 年版 消防年報 P22-23. 白山野々市広域消防本部 統計データ, 2022.