

VRによる消防教育訓練シミュレーションシステム についての考察

横浜市消防局（神奈川県） 岸 信行

1 はじめに

バーチャルリアリティ（以下、VR）技術は、様々な感覚を人工的に再現し、それに伴う体験を作り出すことのできる技術である。

VRは、一般的に「仮想現実」と訳されることが多いが、学術的には、みかけは現実ではないが、実質的には現実である感覚を得られることから「人工現実感」と訳す方が正しいとされている¹⁾。近年では、そのVRを用いたエンタテインメント技術の実用化が推進され、2016年はVR元年と呼ばれ、一般消費者向けに廉価かつ高性能なVRシステムの販売が始まっている。このことから、一般社会にVRという言葉が浸透してきている。VR技術を用いた教育訓練の研究は多数存在し、医療の分野では、腹腔鏡手術の教育訓練において自身が施術する腹腔鏡カメラの映像上に熟練医師の施術映像を重ね合わせて比較表示することで、通常の一で行うドライボックス（腹腔鏡用トレーニング器具）を使ったトレーニングを行うよりもはるかに高い効率で手術の手技を獲得することができている。工業の分野では、高所作業時の落下の危険性を体験させるVRシステムが構築され、鉄道分野でも、軌道内での保線管理時の適正な手順確認と作業中に列車が通過することを想定した危険予知訓練のVRシステムが構築されている。このように多くの分野において社会実装が進んでおり、学術的な裏付けや、VR技術を用いた教育訓練システムが既にサービスとして実用化されているといった社会的な裏付けから、十分にその効果が実証されていると言える。

本論文では、消防隊員の教育訓練に特化したVR消防教育訓練シミュレーションシステム（以下、VR消防教育訓練システム）が災害活動における危険予知や安全管理の教育訓練に有効であるかを研

究し、訓練効果と訓練による身体的及び心理的負担の検証を行って効果的なVRシナリオの設計とシステムの開発を行い、消防訓練への実装を行うことの意義と将来性について述べたいと思う。

2 VR消防教育訓練システム実用化の必要性

全国の消防本部においては、職員の大量退職及びこれに伴う新規採用者の大幅な増加がみられている。全国消防長会の2018年度（平成30年度）版消防現勢では、18歳から30歳までの若年層の割合が33.04%であるのに対し、50歳から59歳までのベテラン層の割合が18.49%であり²⁾、知識や経験を積んだベテラン層の消防職員が減少し、経験の浅い若年層の消防職員の割合が急速に増加したことによる構成比のアンバランスが起きており、消防業務の知識と技術の伝承が困難な状況にある（表1）。加えて、これまでの防災活動の成果によって、総務省消防庁の2018年（平成30年）版消防白書では、全国の火災件数が2017年（平成29年）中と10年前の2007年（平成19年）中と比較して建物火災が31.6%減少しており、毎年6%から8%程度の減少傾向にあるため³⁾、実際の火災現場での活動経験を若年層の消防職員は積むことができない状況にある（表2・3）。

このような現状は、災害対応能力の低下を誘発し、有事の際に迅速かつ的確に消防業務を遂行することができなくなる可能性がある。特に、近年では2020年に東京オリンピックが開催されることや、東日本大震災などの経験から市民の減災・防災意識は高まっており、それ故に消防隊員にはこれまで以上の消防業務の品質が求められている。現状を踏まえると、若手消防隊員が有事の際に現場で十分に消防活動が行えるような教育訓練を施すことは非常に重要かつすぐに対応しなければならない課題であると言える。このような喫緊の課題を克服するためには、災害現場での活動経験と同様な体験が得られるような安全管理教育や災害現場における対応能力を養うための訓練が必要である。現状では、実際の災害を想定した模擬消火訓練

施設や濃煙熱気実火災訓練施設（ホットトレーニング）などを設置することである程度の現場経験と同様な体験を消防隊員に積ませることが可能である。しかしながら、現状の訓練では、訓練施設や装置の設置場所の確保、設置費用や運用費用などに大きなコストが掛かってしまい、実戦的訓練施設を利用した訓練を十分に消防隊員に施すことができない状況にある。このような状況を打開するためには、空間的なコスト、運用コストを低く抑えることで手軽に消防隊員が災害現場で活動を行った時と同様な体験を獲得することのできるVR消防教育訓練システムが必要である。

3 VR技術を消防教育訓練に活用することの革新性

現代のVR技術は、頭部に設置して利用するヘッドマウンテッドディスプレイ（以下、HMD）とコンテンツに応じて触覚などを再現するデバイス（特定の機能を果たす周辺装置）のみで広大なバーチャル空間に没入し活動することができる。このVR技術を用いた訓練シミュレーターは高価な機材などは必要なく、広い訓練場所も必要としないため、会議室などの限られた空間で多くの消防隊員に手軽に教育訓練を施すことができる。また、VR消防教育訓練システム内のソフトウェアを変更するだけで、火災、風水害、地震、NBCなどの様々な災害シーンを体験することが可能になる。

火災を例に挙げると、消防隊員は、火災の推移や煙の移動は知識として大まかな傾向は知っているものの、実際に現場を見てみないと、その挙動や速度感、恐怖の感情などの経験値は身につかないものである。人命の掛かっている危険な現場において、そのような経験値を一切持たないことは、致命的な活動の遅れや判断ミスを誘発する恐れがある。VR消防教育訓練システムを通して、実際の現場でしか得られなかった経験値を若手消防隊員が獲得することで、要救助者や隊員自身の安全を守ることのできる消防活動の品質を維持向上させる一助になると確信している。このような経験値を獲得するために、同じシチュエーションを何度も体験することができる

いう点は、従来の訓練手法では不可能な特筆すべき新規性があると言える。

空間的・時間的なコストがVR技術を利用することで非常に低くなることについては既に述べたが、経済的なコストで言えば、消防隊員の消火訓練において施設を設置して模擬的に火災を発生させ、消火訓練を行う場合、そのコストは施設だけでも数十万円から数千万円のコストが掛かり、それらの施設を維持管理していくには多くのランニングコストが必要になる。VRでは、HMDなどのVR装置と高性能なパソコンさえあれば、何度でも火災現場を再現することができるため、ある程度の初期投資費用が掛かるものの、その後のランニングコストを最小限に抑えることができる。このように、VR消防教育訓練システムは、空間的、時間的、経済的なコストが従来の訓練のコストと比較して非常に小さくなるという点は、消防訓練手法として革新性があると言える（図1）。

4 VR消防教育訓練システム構築において克服しなければならない課題

消防隊員のVR消防教育訓練システムを構築するために求められるものは、VRを用いたゲームなどで行われる大げさな表現などではなく、真の意味で現実に近い火災の推移状況をシミュレートし、火災現場での消防活動と同様な体験を訓練者に積ませることである。このようなVR環境の構築を達成するためには、次のような課題を解決しなければならない。

- (1) VR空間内での火災状況の時間的推移を科学的に検証しデータに基づく、煙、炎、熱の流動性や燃え移りの再現と放水活動により火勢が変化するインタラクティブ（相互作用）の再現

VR消防教育訓練システムの構築において最も重要な点は、火災の燃焼の推移や熱の空間的分布などが、火災現場のそれを精緻に再現されているということである。現状のVRゲームなどにおいても、物体が燃焼している様子や煙などが立ち込める描写は

多々見受けられ、それらは高精細なグラフィクスで描画されることで、一見すると高いリアリティを持っている。しかしながら、これらはグラフィクスの計算負荷を軽くするためや、火炎や煙は演出として描かれるため、リアリティはあるものの、実際の火災時のそれとはまったく異なる挙動をしている。仮にVR空間内での火災性状の精緻な映像再現のクオリティを追求した場合については、情報処理する段階でスーパーコンピュータを用いなくてはならないような莫大なデータ処理が必要になることから、実際に訓練を行う際に用いる高性能なパソコンでもデータ処理ができなくなり、時間経過による火災性状の推移を再現することはできない。精緻な映像再現と実用性のバランスをどのように取るかが課題である。一方で、実際の火災では、火炎や煙の挙動から消防隊員が様々な情報を収集し、消火活動のための判断を下している。このため、VR消防教育訓練システムでは、これらの挙動が現場で起こっているそれと精緻に一致したものである必要がある。火災現場では、複数の物理的現象が重なり合い、相互に作用しあうため、火災の正確な推移状況をVR空間内でシミュレートすることは非常に困難である。また、訓練する上で重要なVR空間内での消火活動においても、何も考えずに、ただ火炎に放水するだけで火勢が弱まるようなゲーム的なシュチエーションでは適正な訓練を行うことができないので、消防戦術に基づく放水効果が確認できるよう、ノズル(筒先)口径の切り替えによる放水量の違いにより火勢が変化するような仕様についても設計する必要がある(図2)。

(2) 消防隊員が複数人で同時に訓練に参加できるシステムの構築

通常、消火活動時には、消防隊員が一人で活動することは非常に少なく、複数人でのチーム単位で活動を行うことになるので、VRシミュレーターにおいても、VR空間内での火災現場においてチーム単位で活動を行うことができるようにシステムを構築する必要がある。さらに、複数人でのVR空間内での活動をデータとして記録しておくことで、チーム内でお互いの視点を入れ替えて体

験することや、火災経験値の高いベテラン消防隊員の動きを迫体験するといった運用が可能になる。これにより、訓練実施後に効果的に各隊員の反省点を確認することができるほか、ベテラン消防隊員がその訓練においてどのように対応したのかを若手消防隊員が体験値として獲得することが可能になる。VRシミュレーターは、実際の訓練場所が狭い室内であっても広大な火災現場での活動と同様な現場体験をさせる必要がある。このためには、実際には狭い空間なのに広大な空間であると感じさせるリダイレクション技術を導入する必要がある¹⁾。また、VR空間にデータ計算量の多い火災の推移をリアルタイムに複数人視点でタイムラグなく提示する必要があり、複数人の消防隊員がお互いにVR空間内で意思疎通や消防活動時のインタラクション（相互作用）が必要であるため、高速なグラフィックスの演算とシステムの同期が可能なVRシステムの構築に関しても解決すべき課題である。

(3) 消防隊員が現場での活動中に利用している感覚情報の同定とその再現手法の確立

VR技術において、人間の感じ取ることのできる全ての感覚を完全に再現することは不可能である。一方で、消防隊員が現場での消火活動において、全ての感覚情報を満遍なく活用して状況判断を下しているわけではないと考えられる。そこで、VR消防教育訓練システムを構築する際には、消防隊員がどのような感覚情報をどのように解釈・利用して、活動に関わる様々な判断を下しているのかを探り、必要最低限の感覚再現デバイス（実際と同じように感じることをできる装置）を用いてシミュレーターを構築する必要がある。この重要な感覚情報の同定とその効果的な再現手法の構築は、VR消防教育訓練システムで取り組むべき重要な課題である。このような感覚情報のプロセスの検証は、突き詰めることで状況判断のコツや非言語的なノウハウとして抽出される可能性がある。これまでベテラン消防隊員が感覚と経験でのみ培ってきた様々な言語では説明しにくい状況判断能力をVR消防教

育訓練システムの感覚再現によって、火災経験を積んでいない消防隊員に伝達することができるようになる可能性がある。これが実現できれば、ベテラン消防隊員が持つ状況判断や災害活動のコツなどを一つのVR消防教育訓練システムの情報として保存し、後世に伝達していけるようになると考えられる。

5 社会実装に向けた課題解決について

消防隊員のためのVR消防教育訓練システムの要件は次の3点になる。

- ・科学的なバーチャル火災現象の再現
- ・複数人が協調作業できるVR環境の構築
- ・消防隊員が活動時の判断に活用している感覚情報の同定

一つ目の「科学的なバーチャル火災現象の再現」については、時間的経過による火災現象の推移を正しく捉える必要があり、火炎や煙の挙動をシミュレートするための熱力学や流体力学などの計算式はこれがある程度満たすものであるが、火災現場では、熱力学や流体力学などの数式のみでは完全解を得られないほどに、複数の物理的現象が重なり合い、相互に作用しあう⁴⁾。このため、火災の推移状況をVR空間内でデータ計算のみで再現することは非常に困難である。さらに、そこに消火活動などのインタラクティブな要素が加わった場合、火炎や煙の挙動は単純な物性科学の計算式のみでは正確に表現することは困難を極める。火災の推移の正確な再現については、構築を目指す訓練シミュレーターにおける解決すべき最大の課題である(図3)。

この課題を解決するためには、建物に見立てた区画内を実際に燃焼させて火災を再現し、区画内で時間経過とともに変化する温度を基軸として、区画内に熱電対(温度を測定するために2つの異種金属線から成る装置)や熱流センサ(熱の量と流れを測定する装置)を多数設置して区画内の熱分布や温度変化、熱流束を計測する(図4)。加えて、火炎が感知できるカメラなどを用いて温度推移により変化

する煙の流動や火炎の挙動を計測し、温度変化に伴う火災性状の変化を詳細に捉えていくことが必要である。また、消防隊員が消火活動を行った際と行わなかった際の区画内の熱分布や温度の違い、煙の流動や火炎の挙動の違いなどについても計測する必要がある。この実験により得られたデータと今までに研究者により計測され、蓄積されている火災性状に関わる研究データや学術的な計算式⁴⁾⁵⁾と比較検討し、得られた様々なデータの組み合わせを検証し、システムに大きな負荷が掛からないように訓練に盛り込む情報を取捨選択することにより、実火災に近似的でかつ演算計算量も低いデータ数値モデルを構築するデータドリブン（測定などで得られたデータを総合的に分析して課題解決に結びつける研究モデル）という研究手法が有効ではないかと考えている（図5）。この研究手法により、火災のプロである消防隊員が満足できる「人工現実感」が得られ、時間経過とともに変化する火災性状の推移を遅滞なく表現できるVR映像を構築するという課題を克服する。消防隊員が消火活動中に最も注意しなければならないフラッシュオーバーが起きる可能性がある温度条件（500℃～600℃）でVR映像に発生させることにより、消防隊員の危険予知感覚や安全管理行動の教育を実現することができる。

温度に着目した理由は、消防隊員が火災現場において消火活動中に逐次変化する温度を意識することは非常に低いと考えており、その理由としては、温度を測定する資器材を保有する部隊は限られ、全ての部隊が保有していないことも一つの原因である。しかしながら、火災性状の変化は温度と深く関係していることを研究論文や学術的な文献から認識させられることが多く、活動中に危険を察知するためには、“**見えない温度を可視化する**”必要があると考えたからである。VR空間内で温度変化に伴う火災性状の変化を体験する機会を得ることができれば、その経験値が体感として備わり、見ることができない煙の量や動き、炎の色の変化により、区画内でのおよその温度を判断することに繋がり、自身が危険な状態にあることを察知することができるのではないかと考えている。

データドリブンによる研究手法を確立するためには、火災性状の測定技術を持った専門技術者、作動負荷を考慮しながら収集したデータの組み合わせを取捨選択し実験を指導できる研究者、選択されたデータをVR映像に移行し再現することができるVR技術者が必要であり、これらを成し遂げるためには、専門の知識や技術を持つ企業や大学などの研究機関の協力を得ることが必須である。

二つ目の「複数人が協調作業できるVR環境の構築」については、VR空間の制御を複数台のコンピューターによって行い、主となる処理をするコンピューターの『サーバ』とそれを利用するコンピューターの『クライアント』に分け、それぞれがネットワークでつながった構成になっているクライアントサーバシステムを構築することにより、火災の演算を行いつつ、火災推移や発生する重要な現象とVR空間内の各人の動きが同期したVRシミュレーターを構築することが可能になると言われており¹⁾、そのような技術を持つVR開発企業も既に存在している。

三つ目の「消防隊員が活動時の判断に活用している感覚情報の同定」については、消防隊員を対象とした聞き取り調査や消防資料の調査を行いながら、消防隊員を使った基礎的な心理・行動実験を通して情報収集する必要がある。例えば、燃焼データを測定する実験中に、消防隊員に複数のセンサを取り付け、そのセンサから得られた環境データと消防隊員の行動データ、聞き取り調査のデータなどから必要と考えられる感覚を選定し、必要な感覚を提示可能な感覚インターフェース（人間と外界との間でやりとりされる感覚情報を再現する機能）として構築する必要がある。このような感覚再現手法はVR研究において数多く研究されている。視覚や力覚（触覚情報に関係する感覚で、物体と接触した際に人間が感じる感覚）、前庭感覚（自分の身体の傾きやスピード、回転を感じる感覚）、嗅覚など様々な感覚再現に関する研究がVR研究者により積極的に行われている¹⁾。

一方で、VRを用いて消防教育訓練を行う場合については、VR

の人体への影響を評価し、それらを踏まえたシステム設計を行う必要がある。VR映像の評価については、ストレスに関係する自律神経系、眼精疲労に関係する視機能、VR酔いに関係する平衡感覚が重要であると言われているが¹⁾、加えて、火災経験の少ない消防隊員が実火災に近い状態を再現できるVR消防教育訓練システムで訓練をした場合にPTSD（心的外傷後ストレス障害）が発症する可能性についても評価対象として研究する必要がある。これらをシステム設計や訓練マニュアルに活かすためには、医学や心理学などの専門分野の方々から助言や指導をいただく必要があることから、大学などの研究機関の協力が不可欠である。

6 おわりに

年々火災件数が減少していくことは、我々消防職員の火災予防の取り組みが社会に活着しているようで非常に喜ばしい。一方で、火災現場において消防の志を同じにする若い消防職員の殉職が発生するなど、消防活動の安全性が危惧されている。「訓練は実戦の如く、実戦は訓練の如く」という先人の言葉を借りれば、“**危険な状況を安全な状態で訓練する**”ことができれば、“**実戦において訓練の経験値を活かせる**”ことになるのではないだろうか。将来において、更に消防業務の安全性が高められるよう、今から準備していく使命が我々に課せられていると強く感じている。

東日本大震災のような自然の営みの中で、我々人間の築き上げてきた科学技術の微力さを痛感させられるが、自然災害に限らず、今後襲い掛かる様々な災害に対して、少しでも抗うことができるよう、消防活動を科学技術によって支える研究開発は、消防の未来に繋がると信じている。

参考文献

- 1) 舘 暲・佐藤誠・廣瀬通孝 監修，日本バーチャルリアリティ学会 編集：バーチャルリアリティ学，コロナ出版，pp.2-10，pp.46-52，pp.246-269，pp,314-326，2010.
- 2) 全国消防長会：平成30年度版消防現勢，
<http://www.fcj.gr.jp/info/>
- 3) 総務省消防庁：平成30年版消防白書，
<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/h30/>
- 4) Ames G. Quintiere 著，大宮喜文・若月薫 訳：基礎火災現象原論，共立出版，pp.14-17，pp.43-57，pp73-127，pp,147-166，2009.
- 5) 一社）日本建築学会 編集：火災性状予測計算ハンドブック，丸善出版，2018.

別添資料

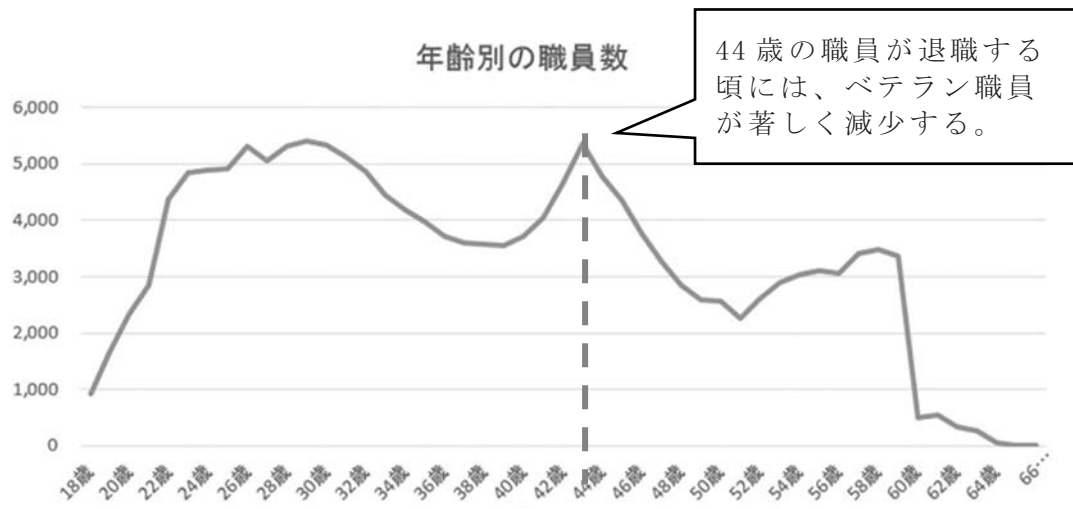


表1 消防職員の年齢別数
(平成30年度版消防現勢から一部抜粋)

区分		平成19年	平成29年	増減率 (%)
出火率	(件/万人)	4.3	3.1	---
出火件数	(件)	54,582	39,373	△ 27.9
建物火災	(件)	31,248	21,365	△ 31.6
人口	(人)	127,053,471	127,907,086	0.7
世帯数	(世帯)	51,713,048	57,477,037	11.1

表2 出火状況
(平成30年度版消防白書から一部抜粋)

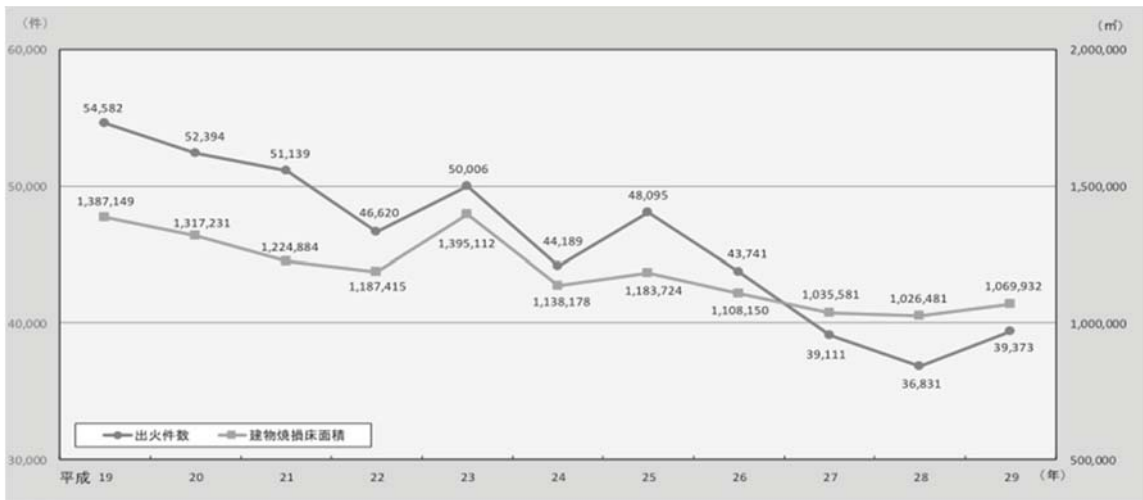


表3 火災の推移と傾向
(平成30年版消防白書から一部抜粋)

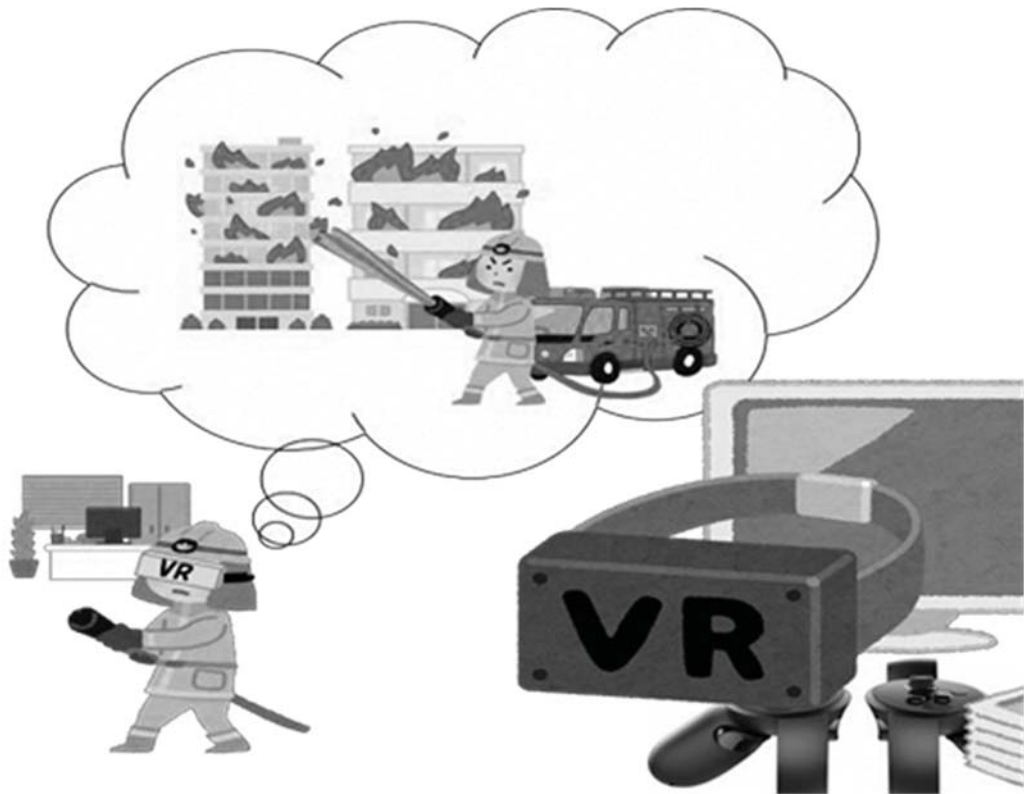


図1 VR技術を活用した訓練イメージ



図2 VR映像上の放水活動インタラクティブ（相互作用）

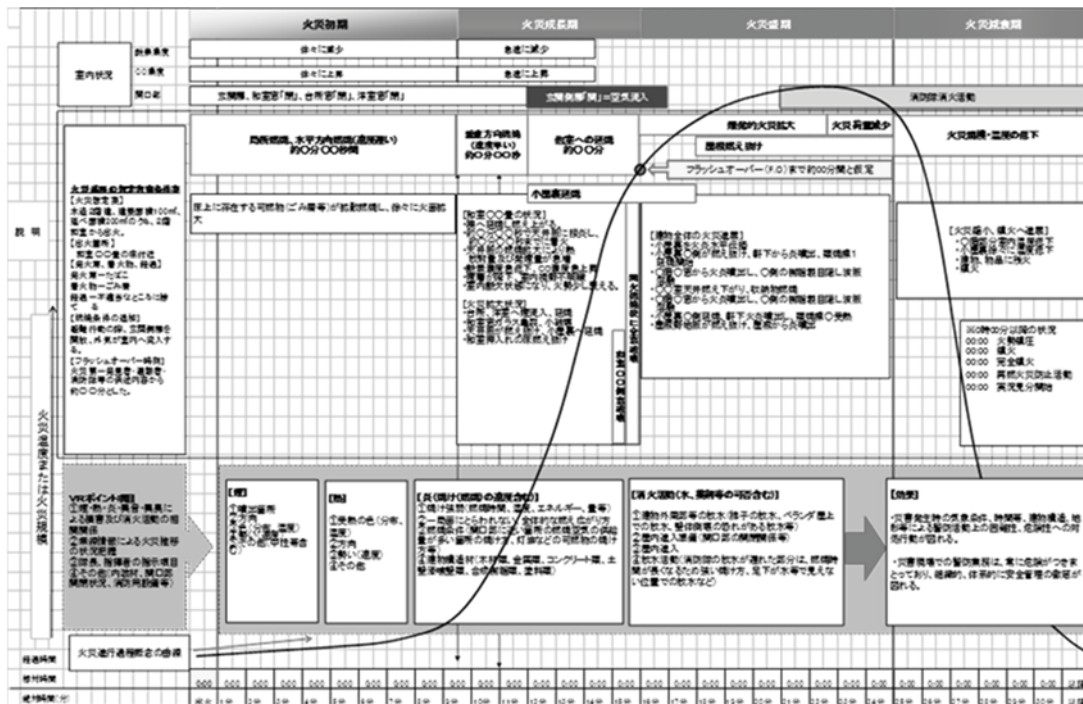
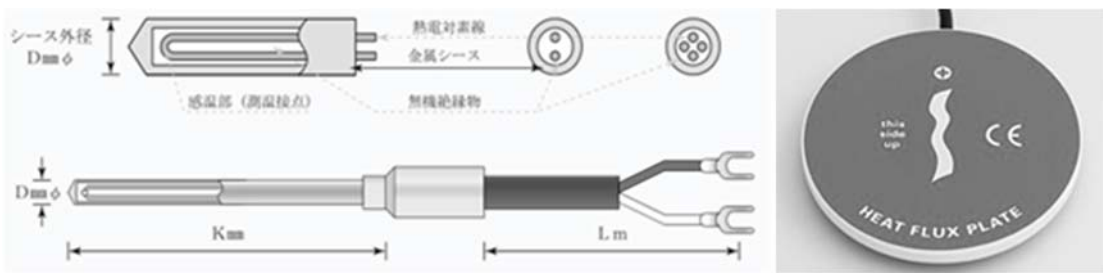
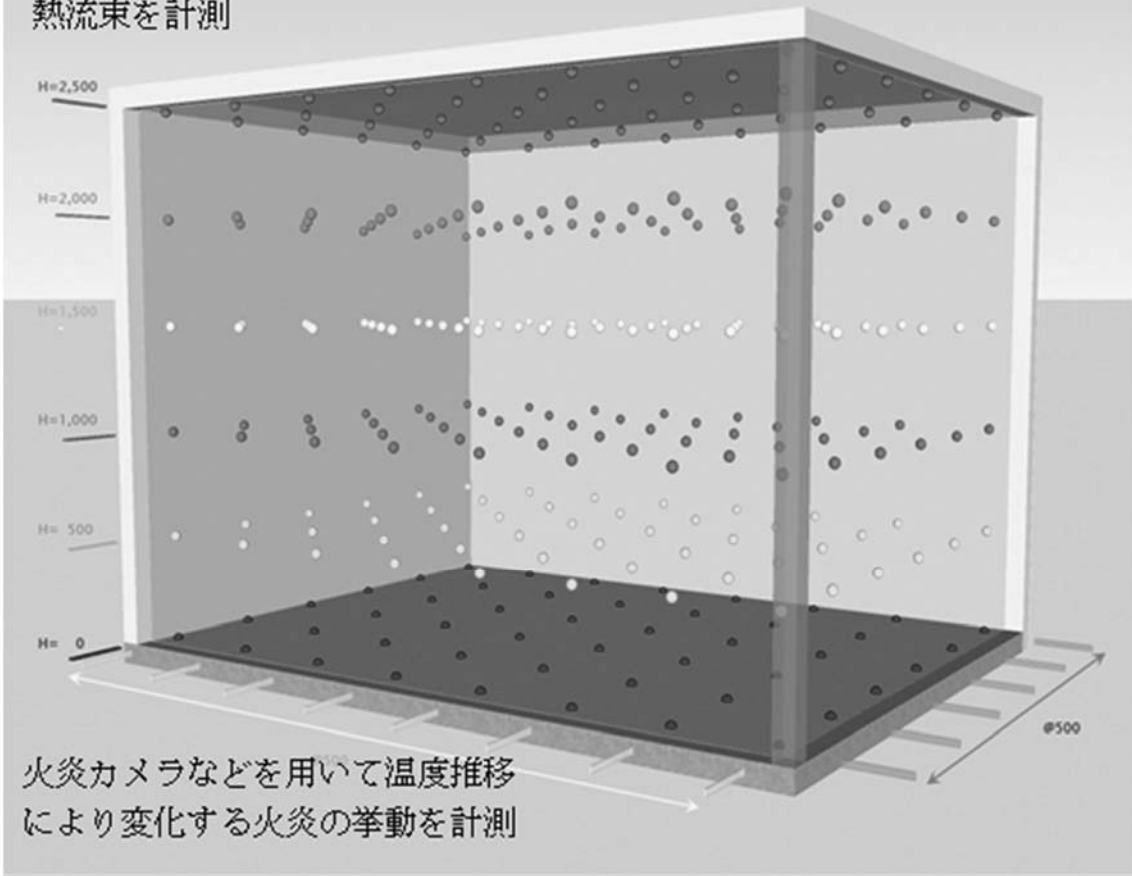


図3 火災の推移状況モデル

熱電対や熱流センサを設置して区画内の熱分布や温度変化、熱流束を計測



(熱電対)

(熱流センサ)



(データロガー)



(火災カメラ)

図4 区画内の温度分布等の計測イメージ

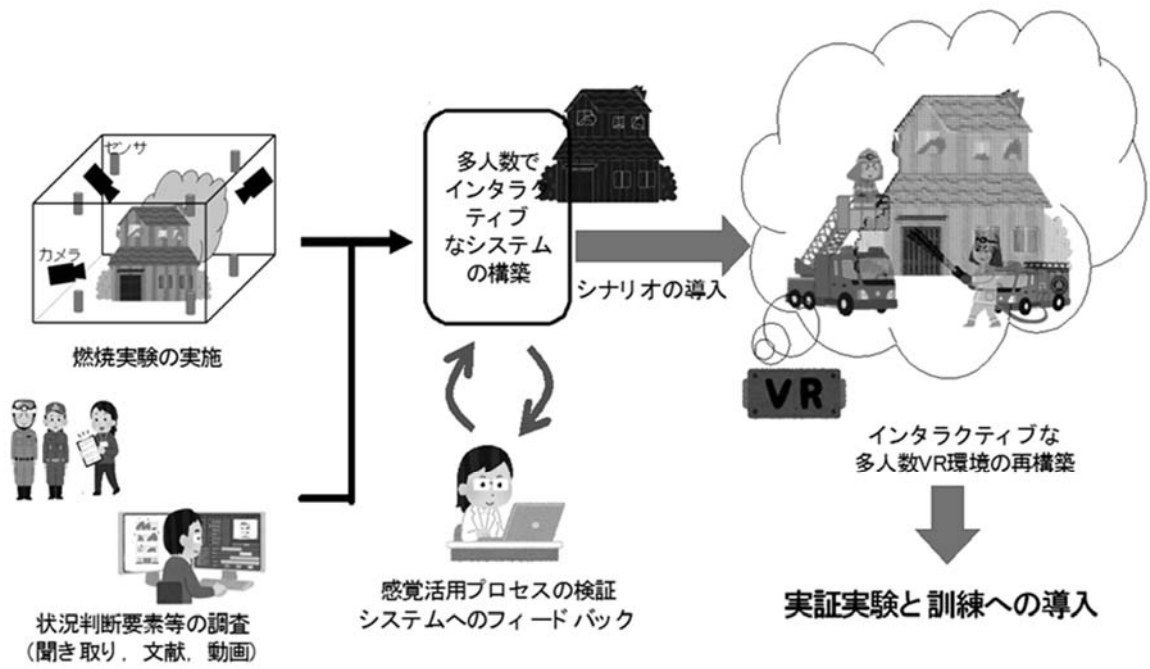


図5 データドリブンによる研究開発イメージ