

地震災害時の「安全・安心」の分析に向けた情報基盤

秋吉 政徳*

Information Platform towards Analyzing “Safety” and “Relief” in case of Earthquake Disaster

Masanori AKIYOSHI*

1. はじめに

近年、大規模災害が多発する我が国では、従来にも増して「災害対策」が喫緊の問題としてクローズアップされている。災害は、大別すると「風雨」、「地震」によるものがあるが、対策には次の違いを考えなければならない。「風雨」の場合には、最近の「ゲリラ豪雨」のようなものを除けば、台風の進路予測や地域ごとの降雨量予測のように予測にもとづいた対策をある程度立案が可能である。一方、「地震」の場合には、まずは危険箇所を同定して安全な待避場所へと誘導することを迅速に行わなければならないが、そのためとしてシミュレーションなどによる事前検討が従来から取り組まれてきた^[1]。このようなシミュレーションは、主として行政担当部局や建物管理企業の主導で行われてきているが、いまだ十分な対策立案には至っていない。その背景には、例えば大規模な地下街などのように不特定多数の人を対象にした場合には、学校や企業あるいは地域コミュニティとは異なり、たまたまそこにいる避難対象の人々の行動としては統制だったものが難しく、行動特性の把握が難しい。また、そのような不特定多数の集団の場合には、パニック行動が発生する場合もあり、複雑で再現性のない状況の下での地震時の災害対応はまだまだ難しいといえる。

本稿では、「地震」発生時に不特定多数の人が集まる場所を対象に、その際の災害対応を検討するために必要な技術についての方向性について述べる。まずは、複雑で再現性のない状況をシミュレーションとしてどのようにモデル化するか、さらにそのような状況下での人々のパニック行動をシミュレーションモデルにどのように反映するか、さらにそのような状況下での人の認知心理特性をどのように把握するか、といった点について述べる。そして、これらの技術を統合することで、新しい「安全・安心」の分析に向けた情報基盤としての構想を述べる。

2. 地震発生時避難課題への対応

「はじめに」で述べたように、「地震」発生時に不特定多数の人が集まる場所を対象にした場合には、避難訓練を通しての基本行動を個々人が有していたとしても、例えば「初めてきた場所での方向

に出口があるかわからない」、「集団の動きに飲み込まれる中で不安になり、基本行動がとれなくなる」といったことで、結果的に統制の取れた避難行動に繋がらないことを含め、複雑で再現性のない状況を分析できる必要がある。分析の前提として、そもそも現実の避難行動のログはほとんどなく、シミュレーションに基づいたものを前提としなければならない。

2. 1 マルチエージェントモデルによる避難シミュレーション

マルチエージェントモデルに基づく避難シミュレーションにより、行動特性を把握しようとする試みがいろいろと取り組まれている^{[2][3][4]}。このような試みでは、空間モデルや歩行者モデルとしてさまざまな検討がなされているとともに、災害データとの連動も行われている。筆者の研究グループでは、同様に空間モデルや歩行者モデルをもとにしたマルチエージェントモデル^{[5][6]}を構築してきたが、人のパニックといった側面に焦点をあてたシミュレーションモデルがないことから、次のような点をシミュレーションモデルに取り入れることで、パニック行動の発現を試みた。従来の「建物火災における避難行動」として緊急時の人間行動特性として 10 個の特性^[7]が触れられている中で、以下の行動特性を組み入れた。

- 追従性(多くの人が逃げる方向を追っていく)
- 向開放性(開かれた感じのする方向へ逃げようとする)
- 出口再検索(向かっている出口到達が困難と判断した場合の向かう出口を再検索する)
- ランダム移動(現在地点からの移動方向が一定でない)

これらに加えて、移動方向先の集団に応じて「歩行速度」を変化させることを歩行者モデルに組み入れる。図 1 は、避難シミュレーションツールの構成を示している。

*教授 情報システム創成学科
Professor, Dept. of Information Systems Creation

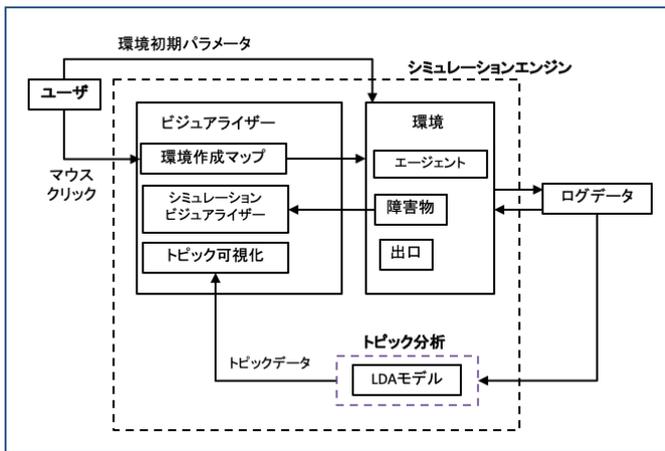


図1 避難シミュレーションツールの構成

エージェントの行動は、環境（周囲の状況）を移動ステップごとに認識することで、各エージェントが行動ルールを切り替えてそのルールを実行することで行動が決定されるが、周囲のエージェントや壁などの空間的影響も反映して最終的な移動先が決定される。行動ルールとしては、前述の行動特性にあるように図2に示す視野を通して環境を認識した上で、「if-then」形式のルールで表現されるものを用いて、図3に示すような行動モデルとなっている。一方、空間的影響の反映においては、ポテンシャルモデル⁹⁾と呼ばれるものを用いており、他のエージェントや壁などからは「斥力」、避難出口からは「引力」を受ける形となっている。エージェントごとに、シミュレーションステップのたびに図4に示すようなポテンシャル場を算出し、その結果と行動ルールから図5に示すように移動先が算出される。



図2 エージェントの視野

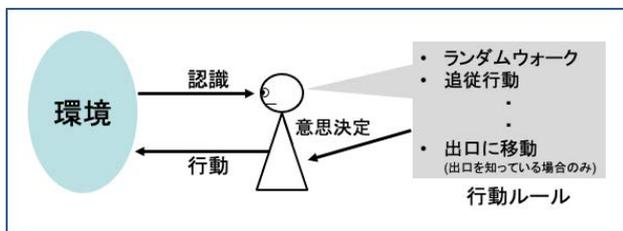


図3 エージェントの行動モデル

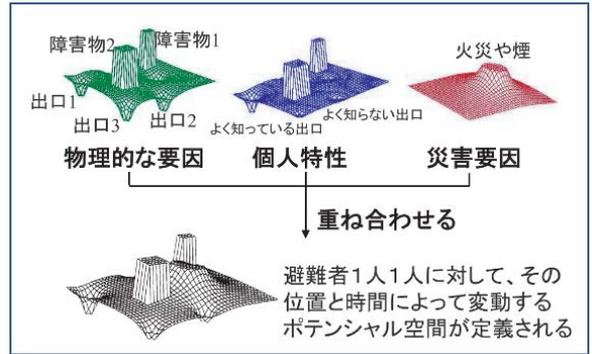


図4 ポテンシャル場で表現される環境

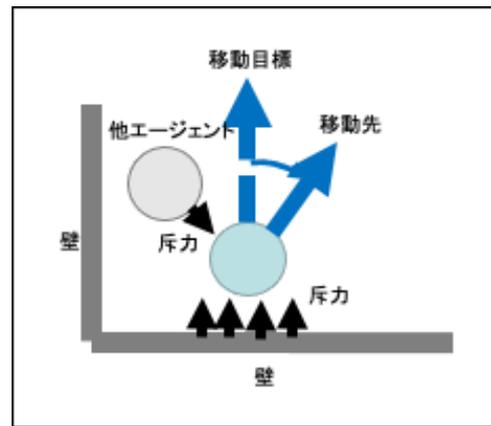


図5 エージェントの移動先の算出

2.2 避難シミュレーションの行動ログからの集団行動分析

2.1節によって算出されるシミュレーション結果、すなわちエージェントごとの行動ログが得られるが、例えば数百体のエージェントの移動ステップを2次元平面上にアニメーション表示したとしても、対策を考えるにあたって、それを集団の行動特性として捉えていちいち目視によって行うことは現実的でない。つまり、前述のパニック行動などのように特徴的な行動の集団を自動的に捉える必要があり、そのためにはエージェントごとの行動ログから集団行動特性に自動的に変換する必要がある。

そこで、「トピックモデルを用いた集団行動分析」⁹⁾を新たに構築した。トピックモデルは、一般的に文章の潜在的なトピックを抽出するモデルとして用いられているが、Bag of Words (BoW) 形式に表現されたデータに関わる確率モデルであることから、文書以外にもBoW形式に変換することができれば、トピックモデルを適用することができる。井上は実際に行われたサッカーの試合における選手とボールのトラッキングデータを、BoW形式に落とし込むことで、チームの攻撃パターンなどをトピックとして抽出している¹⁰⁾。井上のトピックモデルを参考に、避難シミュレーションにおける避難集団行動特性の分析として、新たなトピックモデルの適用方法を試みた。避難シミュレーションログから、トピック分析可能なBoW形式の文書を作成し、トピックの抽出を行う。さらに、各トピックの出現タイミングの同定および、トピックデータをシミュレーション空間に可視化することによって集団行動の分析を行う。

2. 2. 1 語彙の生成

トピックモデルとしての語彙は図 6 に示すように、シミュレーション空間を任意に分割したエージェントの位置、方向を 8 分割したエージェントの移動方向、そして行動ルール名を組み合わせたものを一つの語彙として、トピックモデルに適用可能な BoW 形式にする。

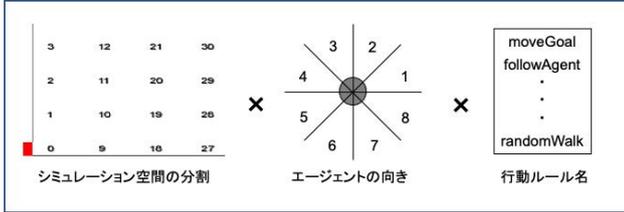


図 6 語彙の構成要素

2. 2. 2 文書の生成

文書の生成には、避難エージェントの集団数が増加した瞬間をシーンの区切りとして生成する。エージェント間の距離が予め設定した距離より短い場合に同じ集団数とした。エージェント行動によっては集団数が少ないステップの間に細かく変化してしまう場合を想定し、文書の単語数が一定数より少なかった場合には、前シーンで作られた文書に追加した。

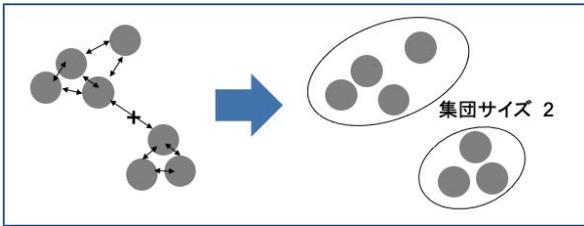


図 7 集団数区切りによる文書の生成

2. 2. 3 集団行動の可視化

行動ログから生成した文書に対してトピックモデルを適用し、トピックの抽出を行うが、その際にトピックに含まれる適合度の高い単語上位 10 件を、対応する場所にヒートマップとして表示し、移動方向と行動ルールを矢印で表すこととする。なお、矢印の色は行動ルールを表している。このようにして得られたトピック分布を、図 8 に示すように 2 次元平面上に可視化する。さらに、2.2.2 節の文書の生成を集団数ではなく、時間区切りとして生成し直すことで、抽出されたトピックの出現順序を明らかにすることができる。図 9 に集団行動の可視化のための分析処理の構成を示す^[11]。

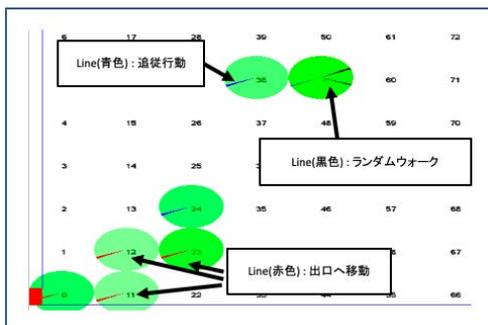


図 8 可視化された集団行動の例

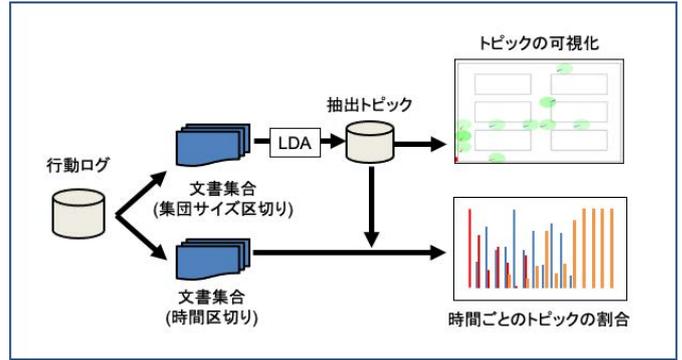


図 9 集団行動の可視化と出現順序抽出の処理

このような機能をもとにして、通路が複雑な地下街などでのシミュレーションでは、各エージェントは 2.1 節で示したような「行動特性」として妥当な判断を行なっているにもかかわらず、出口に向かう途中の場所で出口に向かうエージェントと右往左往するエージェントがぶつかり合って、集団として見ると正しい判断（ある意味での統制がとれた行動）ができないままに避難がうまくいかない場合が発現した。これを現象的にみると、集団としての「パニック」が発現したと解釈できる。

2. 3 避難時の認知特性

前述のシミュレーションでも発現できた「パニック」については、災害時のパニック行動として多くの研究が行われているものの、少人数による実験室実験を始め、まだまだ現実場面と乖離しているものとなっている。その背景にあるのは、実験室実験であれ現実規模のものであれ、「パニック行動」を起こさせた時の「実験参加者の安全」の担保があるために、なかなか取り組みが難しいという問題となっている。

そこで、VR (Virtual Reality) を用いてパニック行動を分析するための検証基盤の構築に取り組んだ。具体的には、多数のエージェント (アバター) がいる屋内施設の中で、先行研究に基づく災害イベントを発生させ、その時の生理反応 (心拍、皮膚電位、指尖温度) や視線、位置を計測することとした。パニック行動を起こす要因として「注意の一点集中」が挙げられている^[7]。これは、緊急時にごく一部の情報に注意が集中し、広範囲に注意を向けることができなくなる状態のこととされている。そこで、VR 環境の中で、避難時にどこを見ているのかの視線を計測し分析することで、パニック行動における注視傾向を明らかにできる可能性があると考えた。さらに、生理反応を計測することで、パニック行動時の心的状態を捉えることを試みる。

エクマンら^[12]は、文化や年齢にかかわらず誰もが同じように表出する情動である、「喜び」「驚き」「悲しみ」「怒り」「恐怖」「嫌悪」の 6 情動における心拍、皮膚伝導率、指尖温度の変化のパターンの違いによってそれぞれの情動を分離した。災害時の情動として考えられる「恐怖」の情動は、心拍、血圧、皮膚伝導率が上昇し、指尖温度は減少することが分かっている。パニック行動は、その個人が持っている過去経験 (施設の事前情報など) と、集団との相互作用、そして被災場面の状況、これら 3 つの相互作用から発生すると考えて迷路探索実験を行った研究^[13]や古田^[7]の研究を参考に、パニック行動を誘発する災害シーンを表 1 ならびに表 2 のように定義して

VR 内で発生させることとした。

表 1 パニック行動誘発のための要因（個人的特徴）と対応する災害シーン

要因	説明	災害シーン
脅威の認知	自分の生命・財産に切迫した脅威を 認知する必要がある	爆発音、煙、火災
強い恐怖感	逃走や殺到といった方向性を持った 行動を引き起こしやすい	悲鳴の声、走って逃走 停電、サイレン
効力感の喪失	自分の力ではどうすることもできないと認知する場合、パニック行動に駆り立てられやすい	火災、出口が閉まっている
脱出路が断たれつつ あるという認知	パニックに陥る人は一刻も早くしなければ脱出路が断たれてしまうという切迫した意識を持つ	人の多さ

表 2 パニック行動誘発のための要因（環境的特徴）と対応する災害シーン

要因	説明	災害シーン
脱出路の不足	出入り口が少なく、脱出が困難な構 造を持つ施設は、他の施設と比べパニックが発生しやすい	閉じた出口
閉鎖空間での過密状態	群集が狭い室内や地下街にある程度 以上の密集状態に置かれている場合にはパニックが誘発しやすい	群集の多さ、空間の狭さ
情報システムの不備	警報装置が正しく作動しないと、公式 情報の欠落により流言などによってパニックが発生する可能性もある	群集デマ
避難を困難にする障害物	煙、停電、非常口の欠如、非常扉の 故障はパニックを誘発する物理的環 境的要因	煙、停電

2. 3. 1 システムの概要^[14]

図 10 に VR 装置と生理指標計測装置を統合したシステム構成を示す。

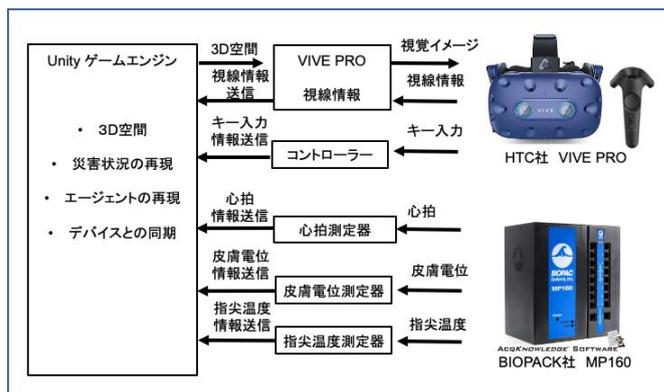


図 10 VR 環境生成と生理指標計測のシステム構成

VR の Head Mounted Display (HMD) は HTC 社の Vive Pro を導入し、Vive Pro のコントローラを用いている。本機は視線の計測も同時に可能である。実験中は、図 11 に示すように片手に計測器を多く取り付けるので、片手で操作が可能なコントローラを選んだ。また、生理指標として BIOPACK 社の汎用生体アンプ MP160 を用いた。心拍数 (Heart Rate: HR)、皮膚伝導反応 (Skin Conductance response: SCR) に加え、指尖温度 (Fingertip Temperature: FT) の 3 つを計測することができる。

システム開発には、ゲームエンジンである Unity を用いている。図 12 に、本システムによって生成される VR 内での被験者が見ている災害時のシーンの例を示す。



図 11 生理計測のための計測器の装着の様子



図 12 生成された災害時シーンの例

被験者実験では、HMD と計測器の装着した上で、片手でコントローラを操作する必要があり、被験者の安全を担保するために「立位」ではなく「座位」で行うこととし、地点ごとの周囲を確認する際の HMD を装着したままの振り向き動作については首の回転だけでは大変なこともあると考え、椅子の回転も用いることとした。図 13 に、被験者実験時の様子を示す。



図 13 被験者実験時の様子

2. 3. 2 実験内容と結果

実験では、ショッピングモールを模した VR 環境を作成し、被験者に予めフロアマップを提示して適当に歩き回って出口や通路の状況を認識してもらい、その後に実験開始時には目標とする地点に向かってもらうこととした。目標地点付近で災害である地震による火災を発生させ、自らの判断で出口への避難を行うこととした。出入口は 3 つあり、出口 3 のみ脱出することが可能であるとした。出口 1 と出口 2 は扉が閉まっておりそこから避難することはできない。また、被験者以外の VR 環境内でのエージェントは 99 体として、災害発生前はショッピングモール内をランダムに歩き回っており、災害発生後では、「出口を知っているエージェント」は 3 つの出口のいずれかに向かい、「出口を知らないエージェント」は「フードコート付近へ移動」あるいは「出口でない方にランダムに移動」という振る舞いをプログラムで実行している。その結果、出口 1 と出口 2 は扉が閉まっているために、エージェントは出口付近で滞留している状態になる。

「パニック行動群」の定義として、アンケート回答で「パニックに陥った」と 6 段階中 4 以上で評価した被験者の中で、以下の行動のいずれかが観測された被験者としたところ、6 名が該当した。

- 一ヶ所の入り口に集中することによる押し合い
- あえて煙の方へ走る
- 避難口でない方への逃走
- 同じ場所を往復

被験者 18 名で実験を行い、実験後はアンケートを行い、視線や生理指標計測とともにまとめた実験結果は、以下のとおりである。

「視線先の距離」について、パニック行動群、非パニック行動群ともに 0~15m 先のものを見ていたが、今回の火災発生時のシーンの中の「壁」、「店舗」、「非常口」、「エージェント（アバター）」、「床」、「天井」のいずれを見ていたかを分析した結果を、図 14 に示す。



図 14 視線先の対象物の違い

パニック行動群は「壁」や「店舗」を注視している傾向があり、非パニック行動群は全体を見ている傾向があった。

「生理指標」としては、以下のようになった。安静期を基準とした時に、「災害期」と「避難期」での心拍の変化を調べると、パニック行動群は災害期で有意差が見られ、非パニック行動群は災害期と避難期それぞれで有意差が見られた。同様に、皮膚電位の変化を調べると、パニック行動群は災害期・避難期それぞれで有意差が見られ、非パニック行動群も災害期・避難期それぞれで有意差が見られた。しかし、災害期・避難期それぞれでのパニック行動群と非パニック行動群での群間では有意な差は見られなかった。同様に、指尖温度での変化を調べると、パニック行動群は災害期・避難期それぞれで有意差が見られた。しかし、災害期・避難期それぞれでパニック行動群と非パニック行動群での群間に有意な差は見られなかった。これらをまとめたものが、図 15 である。

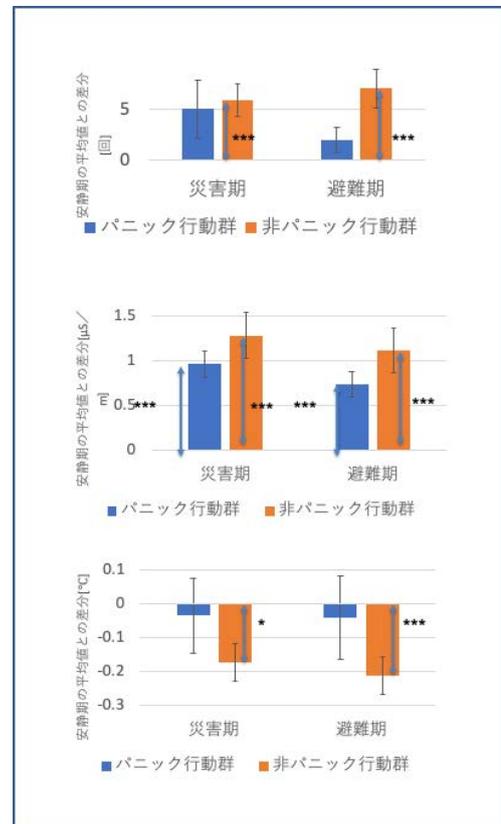


図 15 安静期を基準としたパニックイベント期（災害発生）と避難期の生理指標の変化

3. 「安全・安心」の分析のための情報基盤

2 節で述べた技術は、マルチエージェントモデルによるシミュレーションでのパニック行動を捉えるといった災害時の「集団行動に関わる気づき」、さらにそのような場合の「人の認知心理特性」を明らかにすることによって、「対象空間や設備、避難誘導方法のよりよい策定」といったことへの展開が考えられる。

超高齢社会を迎えた我が国では、高齢者への配慮がますます重要となる中で、デザインの分野では、これまでの「ユーザビリティ」や「バリアフリー」に代えて「インクルーシブデザイン」という考え広まりつつある^{[15][16]}。高齢者や障がい者、外国人は、災害弱者と位置付けられるが、これまではこれらの人々への聞き取り調査等によってデザインが改善されてきたことは明らかであるが、インクルーシブデザインとはデザインの上流プロセスにこれらの人々を巻き込んで、共にデザインを考えていくという点で、デザインプロセスそのものの変革である。2 節の技術を連携させつつ、この考え方に沿った「情報基盤」としての一つの形を示したのが、図 16 である。

図 16 中の右の空間模擬環境では、VR による 3 次元模擬空間では 2.3 節で実施したように HMD や生理計測機器を装着した被験者が、避難者のアバターや自律ロボット(人型ロボットや自律走行車椅子)のアバターとともに災害発生に遭遇し、自らの考えに従って避難行動(移動)を起こす。その際の「行動・視線・生理データ」が、図 16 中の左のシミュレーション環境に伝達され、シミュレーション環境では被験者に対応したエージェントがまず移動し、その次に他の避難者のアバターや自律ロボットに対応したエージェントが、2.1 節の行動モデルに基づいて移動する。このエージェントの行動データが再び図 16 中の右の空間模擬環境に伝達され、アバターの移動となる。すなわち、被験者とエージェント(アバター)が、3 次元 VR 空間と 2 次元シミュレーション平面の中にもともに表現され、2 つの環境間でデータの送受信を繰り返すことで、できるだけ現実での不特定多数の人々が集まっている空間での災害時発生の避難行動を情報基盤として算出する。

図 16 中の左のシミュレーション環境に HMD を装着した「リードユーザ」が組み込まれている。「インクルーシブデザイン」では、対象ユーザの意見を代表する「リードユーザ」をデザインプロセスに組み入れることが提唱されており、ここでは前述の災害弱者である「高齢者」、「障がい者」、「外国人」をリードユーザとして設定し、上記の避難行動のデータ更新サイクルを繰り返した結果をもとに、シミュレーション環境でのエージェント群の行動、あるいは特定のエージェントの視点を反映した行動を VR 画像生成プログラムによりリードユーザに提示し、提示中あるいは提示後の意見収集(例えば、誘導灯が車椅子からは見えにくい、周囲のまごまごする集団によって移動できなくなる)を行い、意見分析プログラムをもとに、実空間模擬のデータ修正プログラムによって実空間での空間構成や自律ロボットの行動データを修正する。

4. まとめ

本稿では、「地震」発生時に不特定多数の人が集まる場所(鉄道駅を中心とした複合施設、ショッピングモールなど)を対象に、その際の災害対応を検討するために必要な技術として、マルチエージェントモデルによる避難シミュレーション及び VR と生理指標

計測機器の活用環境について述べた。さらに、それらを有機的に統合することで、実験室実験や避難訓練等では明らかにできない人々の集団行動特性を明らかにすると共に、災害弱者の意見をデザインプロセスの設計に組み込むこととその活用方法を提案し、「安全・安心」の分析に向けた情報基盤としての構想とした。今後は、この構想の実現に向けて、要素技術の研究とともに、実現には不可欠の計算処理の高速化について検討・開発を進めるつもりである。

参考文献

- [1] 山下倫央, 野田五十樹, 避難シミュレーションの実社会への応用, 情報処理, 55(6), 572-578(2014)
- [2] 太田正幸, 山下倫央, 車谷浩一, 非常時における避難政策の学習による獲得, 情報処理学会研究報告, 2007-ICS-147(5), 31-34(2007)
- [3] 政金裕太, 佐藤佳穂, 岡村吉泰, 岡部篤行, 木村謙, 震災時における避難経路の混雑箇所推定のためのシミュレーション, Proc. of the General Meeting of the Association of Japanese Geographers, 2015s P083(2015)
- [4] 松島弘, 狩野均, 避難者の情報伝達能力を考慮した広域災害避難シミュレーション, 情報処理学会第 76 回全国大会, 4T-7(2014)
- [5] 石田龍星, 秋吉政徳, 避難群集行動における創発現象の発生を目的としたマルチエージェントモデルの構築, 電気学会情報システム研究会, IS19-37, 69-73(2019)
- [6] 石田龍星, 秋吉政徳, 集団避難行動モデルを組み込んだマルチエージェントシミュレーションツール, 2019 年度人工知能学会全国大会, 3Rin2-24(2019)
- [7] 古田富彦: 安全・危機管理に関する考察(その 2) 緊急時の人間行動特性, 国際地域学研究, 6, 239-254(2003)
- [8] D. H. Kim, S. Shin, Local path planning using a new artificial potential function configuration and its analytical design guidelines, Advanced Robotics 20, 111-135(2006)
- [9] 石田龍星, 秋吉政徳, 市川淳, トピックモデルを用いた避難における集団行動特性の分析, 2020 年度人工知能学会全国大会, 4G3GS703(2020)
- [10] 井上寛康, サッカーのトラッキングデータから集団行動を読み取る:行動のシンボル化による試み, 人工知能学会学会誌, 34(4), 517-524(2019)
- [11] 石田龍星, 秋吉政徳, 市川淳, マルチエージェントシミュレーションによる集団避難行動特性の分析ツール, 電気学会情報システム研究会, IS-20-044(2020)
- [12] P. Ekman, R. W. Levenson, W. V. Friesen, Autonomic nervous system activity distinguishes among emotions, Science, 221, 1208-1210(1983)
- [13] 金田英子, 大規模複合災害における被災者の心理過程の特徴, 東洋法学, 58(2), 222-213(2014)
- [14] 新納穰, 市川淳, 秋吉政徳, 屋内災害におけるパニック行動分析に向けた VR による検証基盤, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会, HCS-21-005(2021)
- [15] 塩瀬隆之, 対話から共創する安心: インクルーシブデザインワークショップからの提言, デザイン学研究, 15(3), 44(2007)
- [16] ジュリアカセム他(編), インクルーシブデザイン:社会の課題

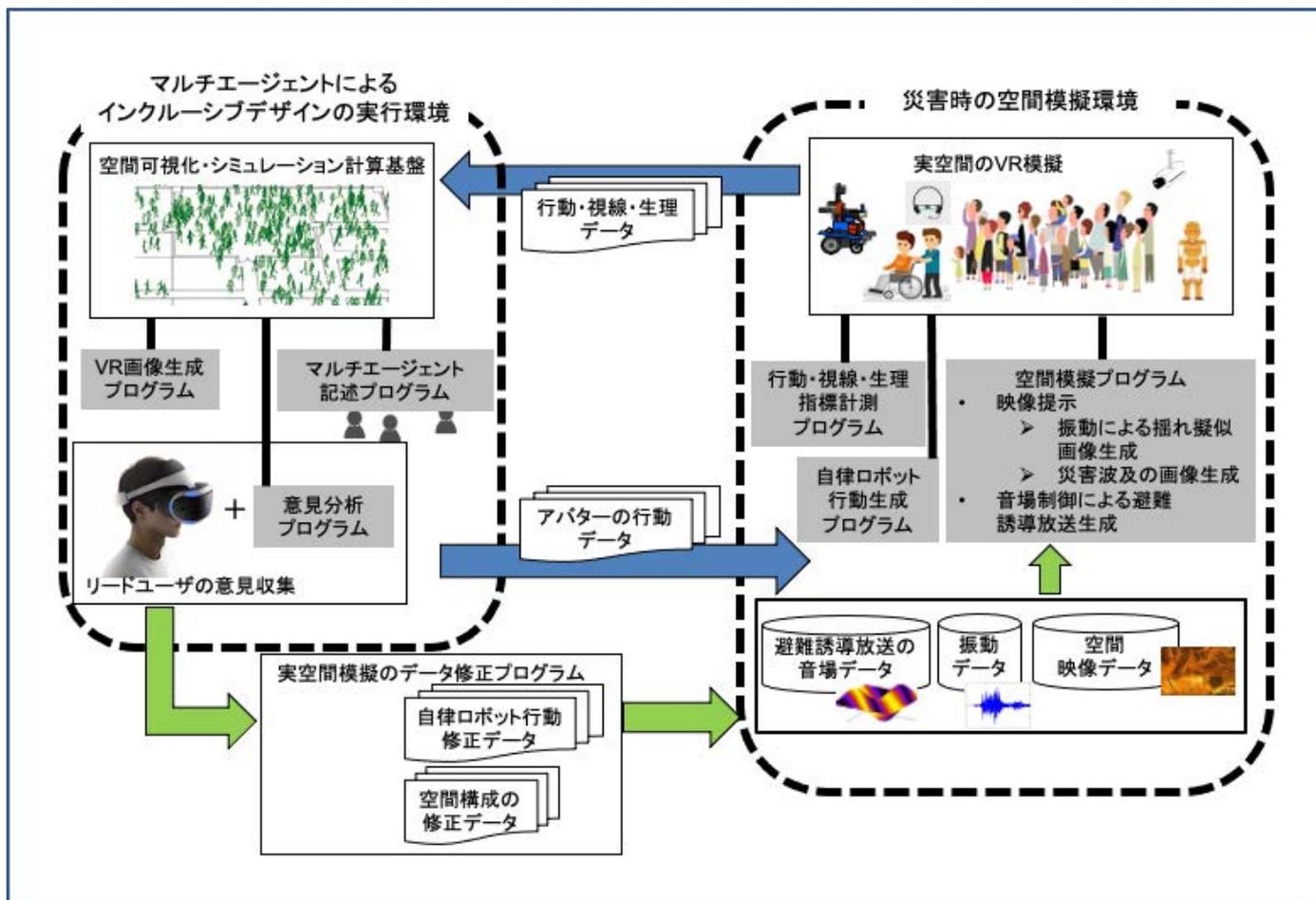


図 16 「安全・安心」の分析に向けた情報基盤