

都市デジタルツインとシミュレーションで実現する データ駆動型まちづくり

倉林 俊成

本研究は、都市デジタルツインでのシミュレーション結果を活用し、都市計画や防災計画にゲーミフィケーションを統合したデータ駆動型の意思決定プロセスの導入を提案するものである。高精度 3D 都市モデルなどのオープンデータを取り込み、多変量なパラメータによる調整可能な災害モデルとシナリオシステムを特徴とした拡張性の高いシミュレーションプラットフォームを市民向けに構築した。三鷹市とその近傍をシミュレーションケーススタディとして実施し、その有効性を検討した。

本研究により、次世代スマートシティの実現と市民参加可能なデータ駆動型まちづくりに新たな方向性を示すことが期待される。

キーワード：デジタルツイン ゲーミフィケーション オープンデータ データ駆動型まちづくり

1 問題意識と背景

現代の都市計画において、効率的なインフラ配置と効果的な災害対策は持続可能な都市開発の鍵となる。だが、貨幣換算が困難な分野における便益以外の妥当性を計量的に評価し最適化することは困難であった。しかし、近年の精細な 3D 都市モデルと演算能力の著しい向上、そしてコンピュータシミュレーション技術の進歩により、都市空間をより精密に仮想空間内に再現し分析することが可能となったことにより計量的評価が可能になりつつある。特に国土交通省のプロジェクト PLATEAU による高精度 3D 都市オープンデータの公開は、都市計画におけるデジタルツインの活用可能性を大きく高めている。

先行研究では、津波や洪水、火災延焼、地域インフラ配置の最適化問題のように個別の課題テーマに基づいた専門性の高いシミュレーションと、防災計画や都市計画の住民周知についての研究はそれぞれ別々になされてきた。災害リスク管理のためのシリアスゲーム手法や防災教育のためのゲーミフィケーションなど、計画にフィードバックするための研究もなされている。

しかしながら、シミュレーション、都市計画、住民周知、評価、フィードバック、これらを統合する市民向けの汎用的なシミュレーターや、その結果を計画に循環する具体的な手法はまだ確立されていない。

2 リサーチクエスション

人々が現に住まい営みがある街においては、まちづくりの計画と効果を実験科学的な手法によって追証実験を行うことも、定量的評価を行うことも困難であった。しかし、演算能力の大幅な向上により数理モデルとその定量的評価法を導入することにより、計算科学的な手法により効果測定が可能になるのではないかという仮説のもと、本研究では、以下の問いに答えることを目的とする。

1. シミュレーション技術を用いて、課題対策をどのように定量化、可視化ができるか？
2. シミュレーションモデルの精度をどのように継続的に向上させることができるか？

3. シミュレーション上で作成された計画の有効性をどのように評価できるか？
4. 地域特性に応じたモデル構築と、汎用性と特殊性のバランスを取ることができるか？
5. 提案する手法は、従来の都市計画・防災計画手法と比較して、どのような改善をもたらすか？

これらの課題解決を通じて、次世代スマートシティ実現に向けた都市計画手法を提供するとともに、市民参加型の評価循環方法について新たな手法を提示する。さらに、デジタルツイン、AI アルゴリズム、そしてゲーミフィケーションを活用した都市計画・防災計画の可能性と課題を明らかにし、今後のデータ駆動型まちづくりの基盤となりうるかの検討を行う。

3 研究方法

3.1 シミュレーションモデルの構築

3.1.1 3D 都市モデル PLATEAU と Unity エンジンを用いたシミュレーション環境の構築

高精度な都市空間情報、物理演算、視覚表現を合わせた仮想空間が都市デジタルツインプロジェクトと表現されるものである。これを実現するために実装したプログラムが本研究のシミュレーション環境だが、システムの基本仕様を項目化するだけで膨大な量となってしまうために、ここでは目論見と、なぜ PLATEAU と Unity を採用したのかとその概略の説明に留める。

・ PLATEAU について

本研究では国土交通省が推進する都市デジタルツイン実現プロジェクト PLATEAU¹⁾ が提供するデータ基盤を活用し、シミュレーションプラットフォームを構築した。

CityGML²⁾ は、建築物、土地利用、交通インフラなどの都市要素を XML 名前空間で定義された拡張性の高いフォーマットである。PLATEAU プロジェクトのオープンデータには、各都市の地形情報、建物情報、道路情報、ハザードマップなどの情報が内包されているため、より高精度な都市空間をデジタル上で再現することが可能となっている。

3D 都市モデルに含まれている建物の詳細度は、「LOD (Level of Detail)」で定義され、PLATEAU では1〜4で示される(図1)。LODが高いほど、都市の空間再現度が高い。データ未整備都市、粗い立方体模式の LOD1 しかない都市、樹木や信号などの情報まで整備された都市、建物内部や地下空間までデータ化が完了している都市など、データ整備進捗度は地域によって異なる。2024 年の三鷹付近のデータでは三鷹駅前地区だけ LOD2 がサポートされ、他は LOD1 に対応している。



出典：国土交通省

図 1 PLATEAU 3D 都市モデルの特徴と活用法 LOD による詳細度の違い

・Unity について

Unity などに代表されるゲームエンジンを採用した理由に、物理演算の高度な精度にある。これらのゲームエンジンは、衝突弾性運動、重力加速度運動などといったニュートン力学レベルの基本物理法則を搭載しているため、ゲーム世界だけでなく、建築、都市計画、工業プラント設計、防災シミュレーションなど、幅広い分野での応用を可能にしている。またゲームエンジン側でユーザーの様々な実行環境に対応しているので、作成したものを広く配布するのに適している。

・目論見

電子空間上のシミュレーションの利点は実験速度である。例えば物体の落下速度を計測・観測するような実験でも、仮想空間内であれば実観測時間に縛られず演算力が許す範囲で何度も試行ができる。現実では難しい想定の実験を行えるのも仮想実験ならではの利点である。

PLATEAU による高精細なデータを物理演算上に取り込むことで、仮想空間内に都市モデルの構築をした。これにより現実では難しい想定の実験を行うことができる。またゲームエンジン上で再現しているので、これらをゲームとして広く一般に配布することも可能である。

本シミュレーションプラットフォームにプログラム上の実装は行ったが、本研究では検証しきれなかった部分として、特に今後のまちづくりに有用そうな下記項目については後段の補論にて詳述する。

- ・タワーディフェンス型ゲームメカニクスの実装
- ・シリアスゲーム手法による災害・インシデントの模式化
- ・疎結合設計とゲーミフィケーションによるフィードバックループ

3.2 データの収集と統合

3.2.1 オープンデータ、秘密情報、収集情報について

オープンデータは行政や自治体が提供する公共性の高い情報群であり、各種統計情報や位置情報、観測情報なども含む。自治体ごとに公開項目や状況が異なるが、制限なしにアクセスできるものが一般にオープンデータと呼ばれるもので、アクセスに情報公開請求など手続きや許認可制限があるものは含まない。

アクセスに制限があるものには、個人情報や顧客情報、企業の営業情報などがあり、秘密情報（コンフィデンシャルデータ）と呼ばれる。法や組織のルールに基づく取り扱いが求められる。

データをオープンにするには秘匿性と公利益のバランスを保つ必要があるため、量が増えるに従いコストも上昇する。まちづくりに必要な関係変数は多岐にわたり、かつ直接観測できない潜在変数も多いため、本研究では目下利用可能なオープンデータのみを対象としてシミュレーションを構築した。今後テクノロジーの進歩で収集される情報やその価値が変わる可能性が高いため、多変量なパラメータにて調整できるよう設計した。

3.2.2 3D 都市モデルとデータ統合手法の確立

本研究における 3D 都市モデルの構築にあたって、主として G 空間情報センター³⁾ を介して提供される国土交通省・法務省のオープンデータを基盤として採用した。

機械判読性の低いデータや、データ粒度の不統一性も大きな技術的障壁となったが、データ間の疎結合を重視したアーキテクチャを採用し、自治体ごとにステージとシナリオを分けることで回避した。これは、特定の自治体向けに最適化されたモデルが他地域での転用を困難にするという問題を回避するためである。

3.3 模擬的災害環境の構築

本研究では、3D 都市空間とコンピュータシミュレーションを用いて、模擬的な災害環境を構築し、都市における災害の発生と対応プロセスを再現・分析する。

3.3.1 ごみが散らかった状態と清掃モデルの構築

ごみ散乱などは、まちづくりのシミュレーション上は利用価値が低いものであるかもしれないが、経路探索や対象物探索が 3 次元空間内における衝突判定やオブジェクト操作の基礎となるため、これについて詳述する。建築物破壊や火災の可燃物の放出アルゴリズムなどはこの衝突アルゴリズムをベースとして構築されているためである。

災害時の都市環境を模擬的に再現するため、3 次元都市空間内にごみ（衝突物理特性をもつ可燃オブジェクト）の散乱状態と清掃ロボットの行動モデルを構築した。建物が倒壊した際に生ずる可燃物の散乱状態については、建物の容積率と敷地面積を考慮した周辺に分散するモデルを採用した。

清掃ロボットの移動モデルには、Unity の NavMesh AI アルゴリズムを採用し、障害物や地形の起伏を考慮し作成された歩行可能面をエージェントが目的地までの経路探索を行う。ロボットは視界内で検出したごみまでの到達可能な経路を算出し、電源供給地点からの距離制限を考慮しながら清掃活動を行う。この際、地形の変化による経路の遮断を動的に再判定し、実際の災害現場で想定される制約条件を反映させた。本モデルの特徴は、従来の 2 次元平面上のシミュレーションと異なり、3 次元空間における地形の起伏を考慮した現実的なロボット掃除機にも再現が可能な点である。

3.3.2 火災と消火モデルの構築

都市火災の振る舞いを再現するため、物理演算エンジンを活用した火災延焼モデルを開発した。モデルの核と

なる要素は、建築物の破壊過程、可燃体の放出と延焼、火勢の変化、および消火活動の相互作用である。これらの要素は科学的な発火延焼現象に基づいて調整し、高い再現性を再現するに至った。

建築物は火災による影響を受けると一定時間後に倒壊し、その容積率に応じた可燃物を放出する。放出された可燃物は独立した物理特性を持ち、火災の影響圏内で炭化して火勢を増大させる。火勢の増大は輻射熱範囲で延焼範囲の拡大をもたらし、最盛期には炭化物が飛散し延焼範囲が拡大する現象を再現した。特に風向や風速の環境要因は延焼方向に明確な指向性を与え、これは実際の都市火災での延焼シミュレーションと近い状態⁴⁾を示すように調整した（図2）。

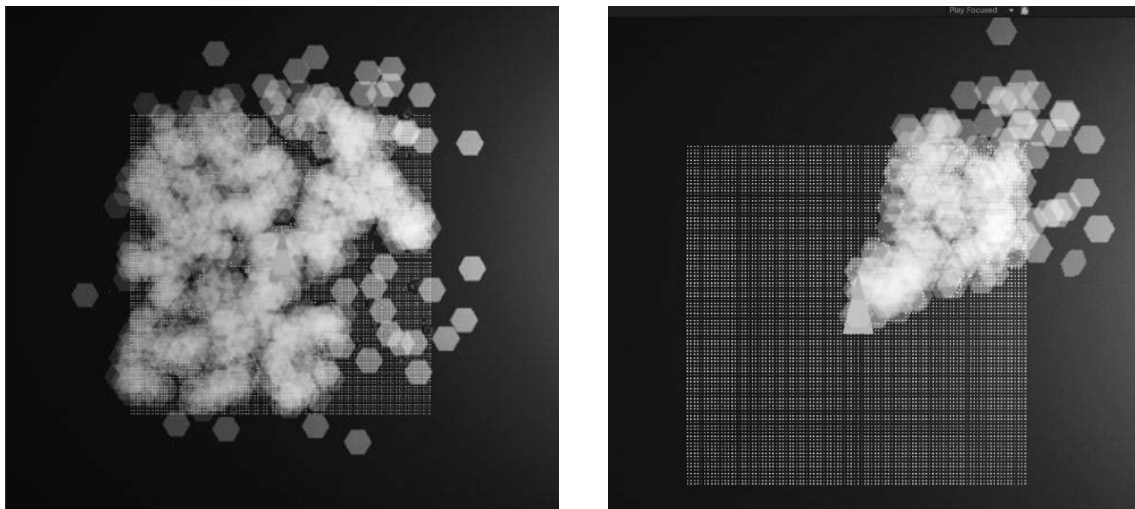


図2 無風状態で中央部から同心円状に延焼した例（左）と、南西の風 12m/s を付与した例（右）

遮蔽物による延焼遅滞効果を考慮するために、防火壁を実装し一時的な延焼の遮断と時間経過による火災の回り込みによる延焼過程も表現することに成功した（図3）。また、複数の火源が近接した場合には火元を統合した。

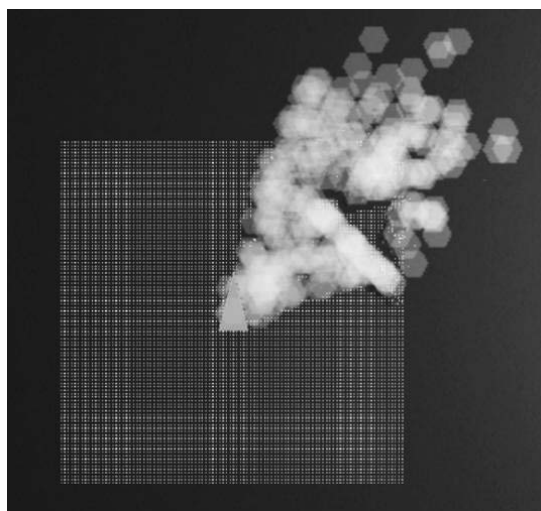


図3 防火壁がある場合は壁の外側は一時的には延焼しないがやがて火は回り込む

消火活動のモデル化では、消火タレットによる放水を実装し、放水射線や重力影響、火勢の低下から鎮火までの過程を表現した。火災最盛期には消火能力を上回る延焼拡大が発生するものの、可燃物供給の有限性により、最終的な鎮火に至る過程を再現することができた（図4）。

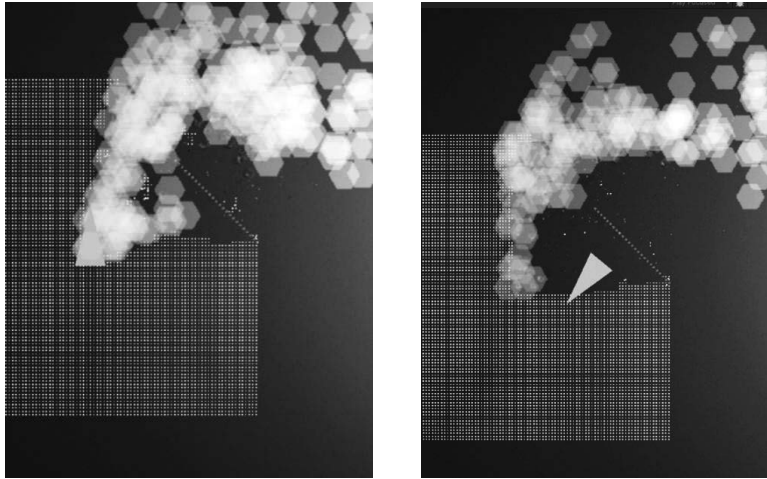


図4 火災最盛期には消しきれないが可燃物の供給には上限があるのでやがて鎮火する

シミュレーションの技術的課題として、延焼拡大時に時間経過とともに指数関数で発生する数十万オブジェクトの同時処理が必要となるが、メモリ、演算能力の制限から非同期分散処理による最適化を採用した。これにより、時間精度の再現性は落ちるが、計算割当時間内での大規模火災シミュレーションが可能となり、都市スケールでの火災シミュレーションの応用可能性を開いた。

シミュレーション速度を早めるために燃焼までの速度を1～20倍まで可変的に変更できるようにした。火災の延焼速度については東京都消防庁が作成した地震時の火災延焼速度式「東消式2001」⁵⁾を参考したが、本シミュレーションでは簡便に繰り返すことを重要視したため延焼速度時間の精緻さについては劣後とした。

3.3.3 降水と水面上昇による水害モデル

都市における水害の動態を精密に再現するため、物理演算に基づく降水・浸水シミュレーションモデルを開発した。このモデルでは、降水を物理的な影響を受ける球体として模式的に表現し、地形の起伏に応じた水の集積過程を再現している（図5）。

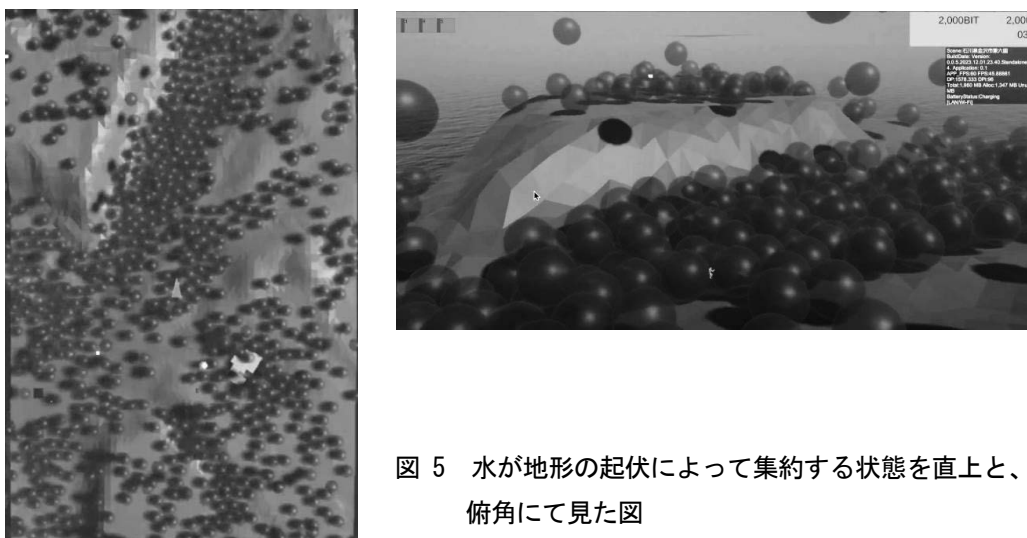


図5 水が地形の起伏によって集約する状態を直上と、俯角にて見た図

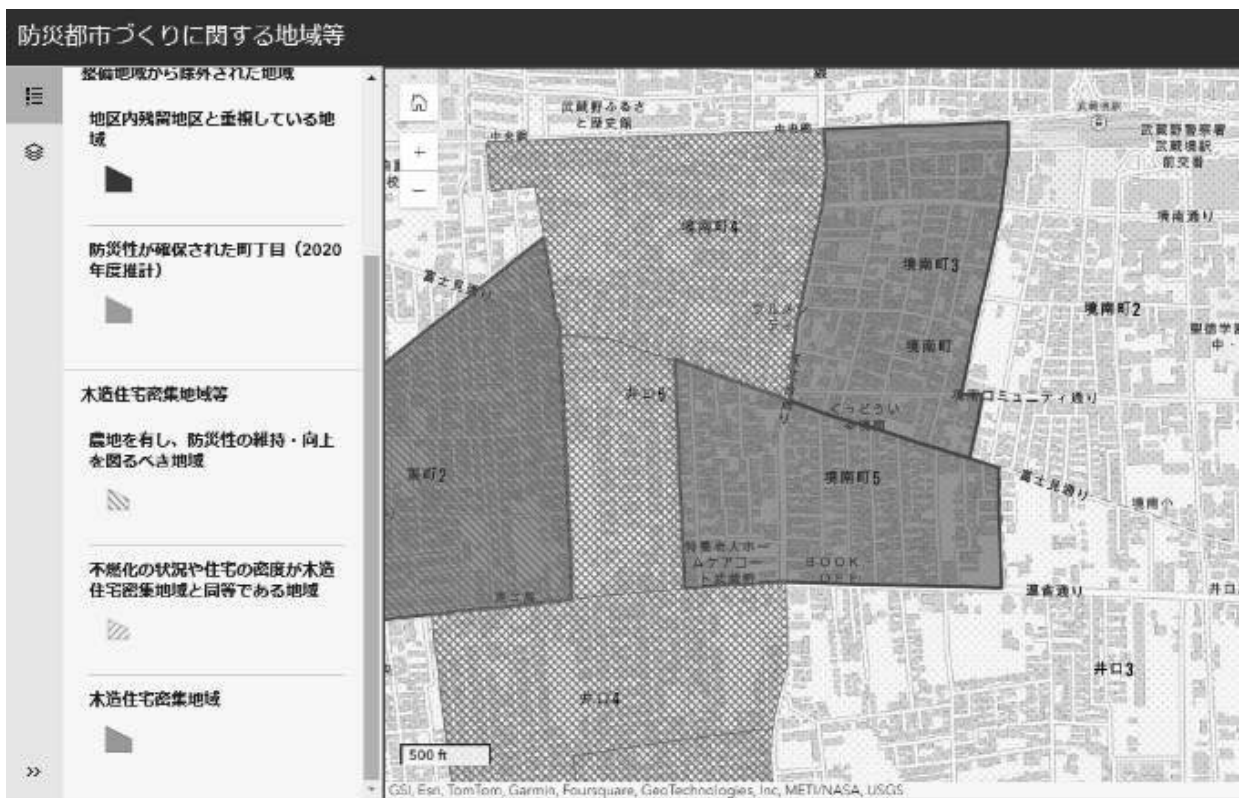
水球の挙動は、地表での滞留時間、球体同士の合併による体積増加、および建築物への影響を考慮した。水球が集合すると体積が増加する。体積が増大した水塊による建築物への損傷過程は、局所的に集積した水が建築物へ与えるダメージを想定している。また、河川等の水域への流入による水位上昇を再現し、低地からの浸水過程を時間経過とともに段階的に観察することができるようにした。

本モデルの特徴は、ミクロな水の挙動からマクロな浸水被害までを統合的に観察できる点にある。これにより、都市構造における脆弱性の特定や、効果的な防災インフラの配置計画の検討をより具体的なものとすることを念頭とした。

4 研究結果

4.1 市街地延焼火災の事例研究(武蔵野市堺南町)

東京都不燃化ポータルサイト(図6)にて木造住宅密集地域とされている、武蔵野市堺南町3丁目、5丁目の隣接地で戸建て住宅街と大型住居ビルや小学校が隣接している堺南町2丁目を中心に広域延焼火災のシミュレーションをした。



出典：東京都不燃化ポータルサイト 防災都市づくりに関する地域等

図6 堺南町付近では木造住宅密集地域など防災性の維持向上を図るべき地域として指定されている

地域に地震が発生した想定でエリア内の5件の建物が倒壊、そのうち2箇所から時間差で出火した想定。風速は12m/s、風向は北北西(12月から2月の東京の気象観測地点における最も頻度が多い風向)とした。この建物倒壊件数や失火件数などはプログラムを変更することなく設定ファイルから簡単に変更をできるものである

がここでは事例研究のため固定条件とした。

東京消防庁が想定する延焼シミュレーションでは、12月から2月の東京の気象観測地点における平均風速の約2倍の6m/sにて想定されているが⁶⁾、2016年の糸魚川市の大規模火災では風速10m/s前後、最大瞬間風速24.2m/s⁷⁾、2025年に発生したアメリカロサンゼルス大火災が風速約22m/s⁸⁾、2025年の大船渡市の山林火災では最大瞬間風速18.1m/s⁹⁾であったことをふまえ12m/sとした。

風速が強い場合で散水処理などの鎮火系の対策ユニットの配置を行なわなかった場合、木密地域ではエリア全体の焼失は免れないが、防火帯となる道路や農地、校庭などがある場合は延焼拡大がある程度は停止することも見てとれた(図7)。



図7 堺南コミュニティ通りや、富士見通りの道路幅での火災の延焼遅滞が見られた

風速12m/sの場合、堀内式¹⁰⁾による延焼限界距離は出火から30分では約12m、出火より60分を超える場合は約36mだが¹¹⁾、シミュレーション結果もこれと近く、非常に簡易なデジタルツイン空間内で大規模火災のシミュレーションが簡便に再現できることがわかった(図8、図9)。

火災風洞実験などでされるような開口噴出火炎形状は考慮せず、先の模擬的災害環境の構築で説明したように輻射熱影響範囲のみで延焼を定義しているが、可燃物が爆ぜる際に物理特性を持っているので、これが高さ方向の炎の振る舞いを模擬的に補完した可能性がある。他方、建物が倒壊した際に可燃物の放出を建物の円周状に放出しているが、床面積が大きい場合は疎になるので、現在のモデルでは難燃化された大型建造物や高層ビル火災などのシミュレーションについては課題があることもわかった。

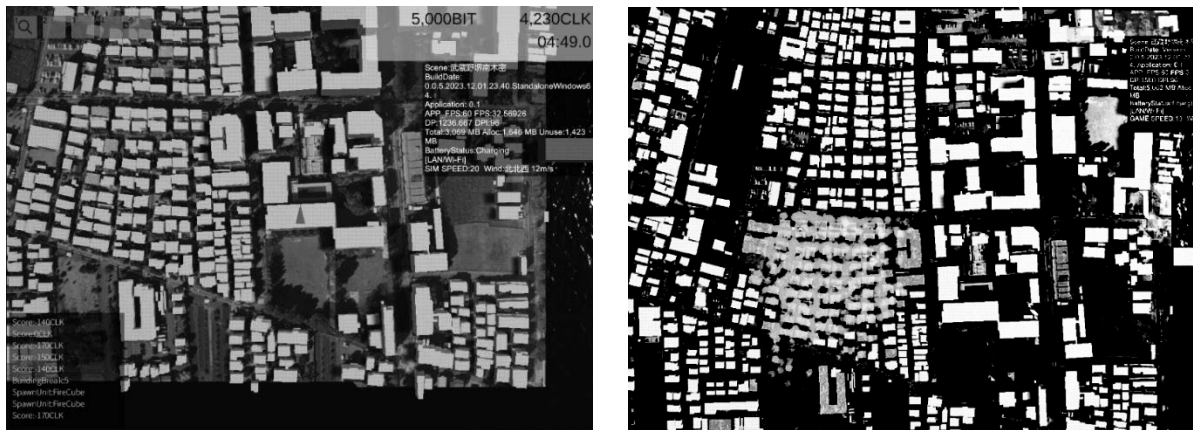


図8 延焼進行ケース1

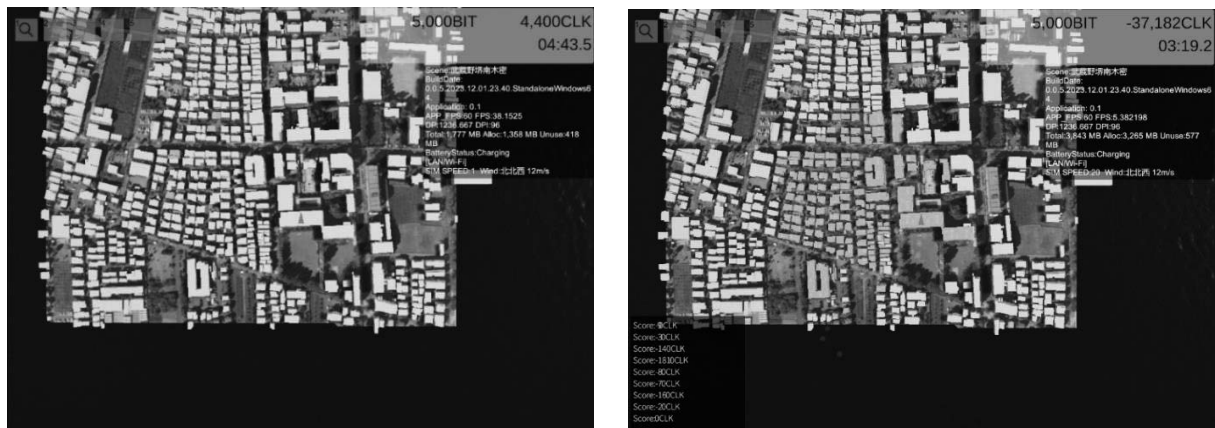


図9 延焼進行ケース2

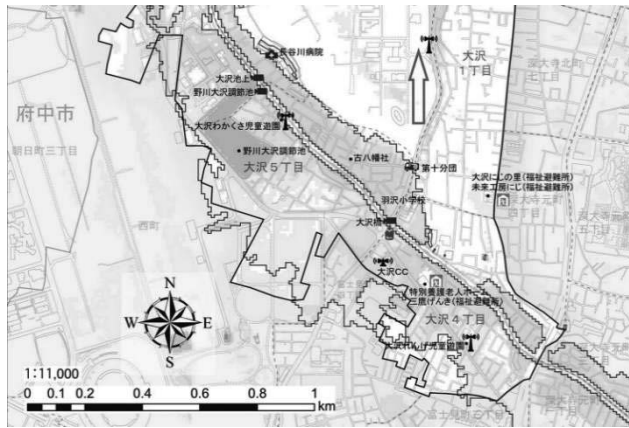
4.2 大雨水害の事例研究（三鷹市大沢）

ハザードマップ（図 10）で浸水被害が想定されている三鷹市大沢地区を中心に大雨水害のシミュレーションをした。

4.2.1 大沢地区の地形的特徴とハザードマップについて

東京都がある武蔵野台地は主に二種類の河岸段丘から構成され、一段高い武蔵野段丘面と、低位面の立川段丘よりなる。三鷹市大沢地区はこの段丘面の境界域にあたり国分寺崖線と呼ばれる段丘崖を地域に含む。武蔵野段丘側の帯水層が地表に出るため湧水が豊富で、一級河川である野川に流れ込んでいる（図 11）。野川の北側は崖となっており（図 13）、大雨の際には低地側に水が多く流れ込むため避難警報や浸水被害が度々発生している（図 12）。

平成 17 年以降の三鷹市の大沢地区の浸水履歴を確認¹²⁾すると、大沢 1 丁目 18 番（羽沢小学校北側）で 2 回、大沢 1 丁目 13 番（天文台東側）、大沢 2 丁目 16 番（大沢の里古民家北側）で発生している。



出典：三鷹市

図10 浸水ハザードマップ大沢付近



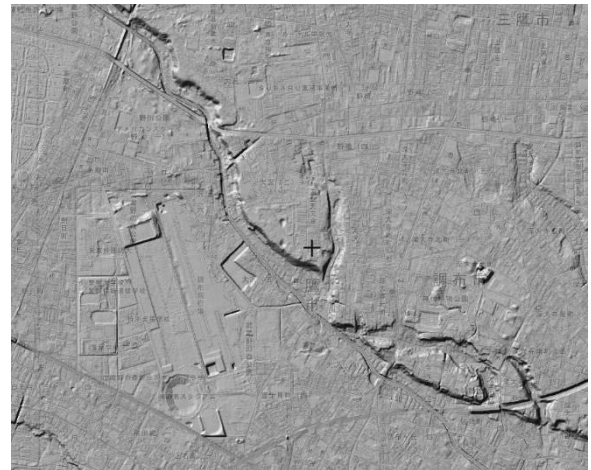
出典：東京都下水道局

図11 野川・仙川・入間川・谷沢川及び
丸子川流域 浸水予想区域図



出典：東京都建設局

図12 水害リスク情報システム浸水実績図



出典：国土交通省国土地理院

陰影起伏図+標準地図を合成

図13 山岳部と比べ高低差がないために見下ろして
は起伏確認がむずかしいが崖線を確認できる

デジタルツイン内では中に入り込んで様々な角度から地形を観察することができる(図14)。また、地表の建物を非表示にし(図15)、縦軸方向をn倍にするというような起伏の強調も容易に変更可能であるため、起伏に対する理解を一層深めることができる(図16)。



図 14 大沢グラウンド方面から天文台方向を俯角視点にて



図 15 大沢グラウンド方面から地表の建物を除いた視点



図 16 起伏を誇張するために縦軸方向のみ 3 倍に拡大

4.2.2 雨の流れ込み被害についてのシミュレーション

起伏に富む地形に雨が降った場合、雨がどこに集まるのか時間経過観察をした（図 17）。水球体を落下させることで、どのエリアに水がたまるか、雨だれの集積場所を目視できる。図 18 では、谷筋にある羽沢小学校付近に水滴が集中するのがみてとれる。



図 17

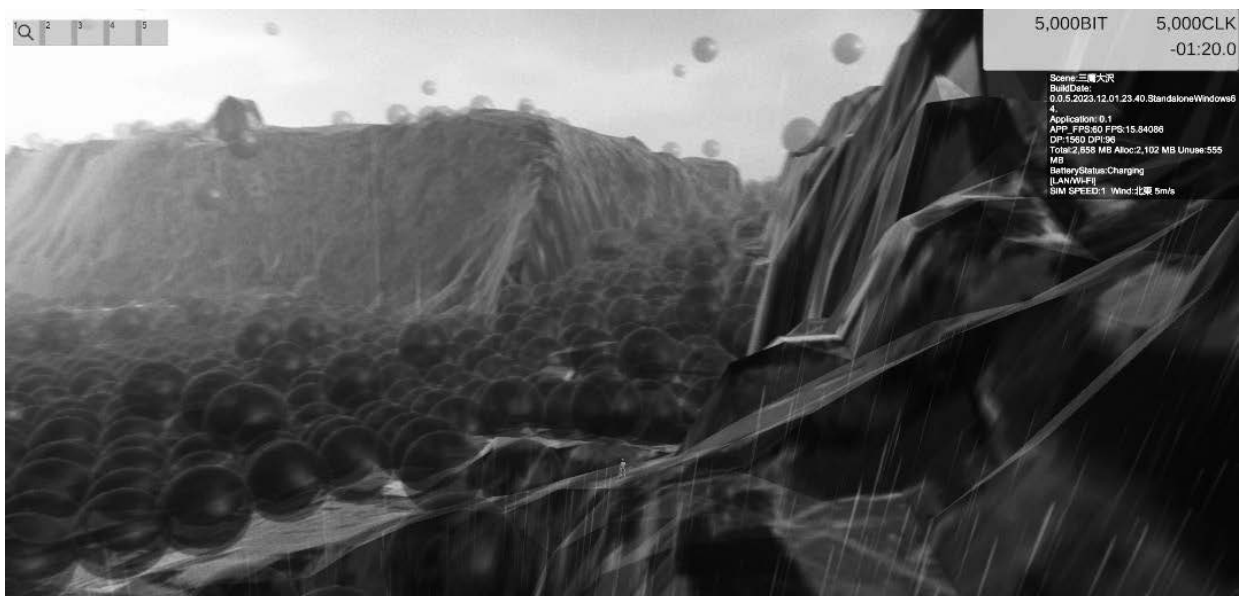
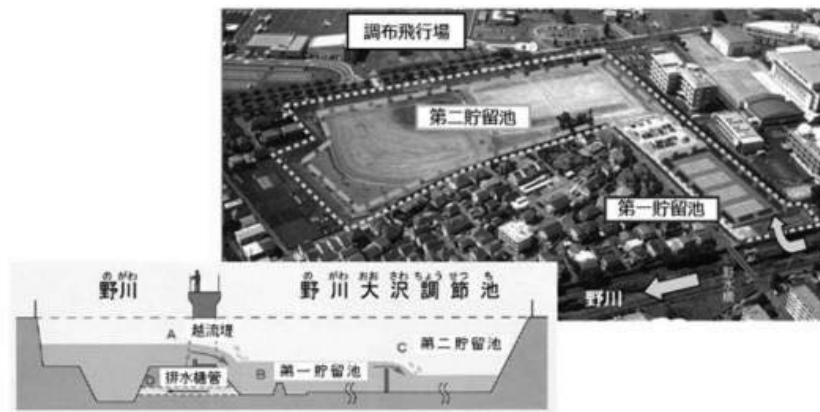


図 18 起伏を縦軸方向に 5 倍にした羽沢小学校付近

4.2.3 野川の増水と洪水についてのシミュレーション

野川大沢調節池は平常時、三鷹市大沢野川グラウンドとして利用されるが、野川氾濫の際には、第一貯留池、ならびに第二貯留池に大水を流入させる遊水地機能を持っている（図 19）。本シミュレーションでは野川が増水したケースを想定し、川面の水位を 2m 上昇させた（図 20）。大沢グラウンドの遊水地が機能していることがみてとれたが（図 21）、同レベルの水位上昇が発生した場合は下流部（大沢 4 丁目付近）では腰高まで浸水する箇所があることが確認できた（図 22）。



出典：東京都建設局 野川大沢調節池（野川）

図 19 野川大沢調整池の全景としくみ



図 20 野川の水面を 2m 上昇させたときの野川の様子

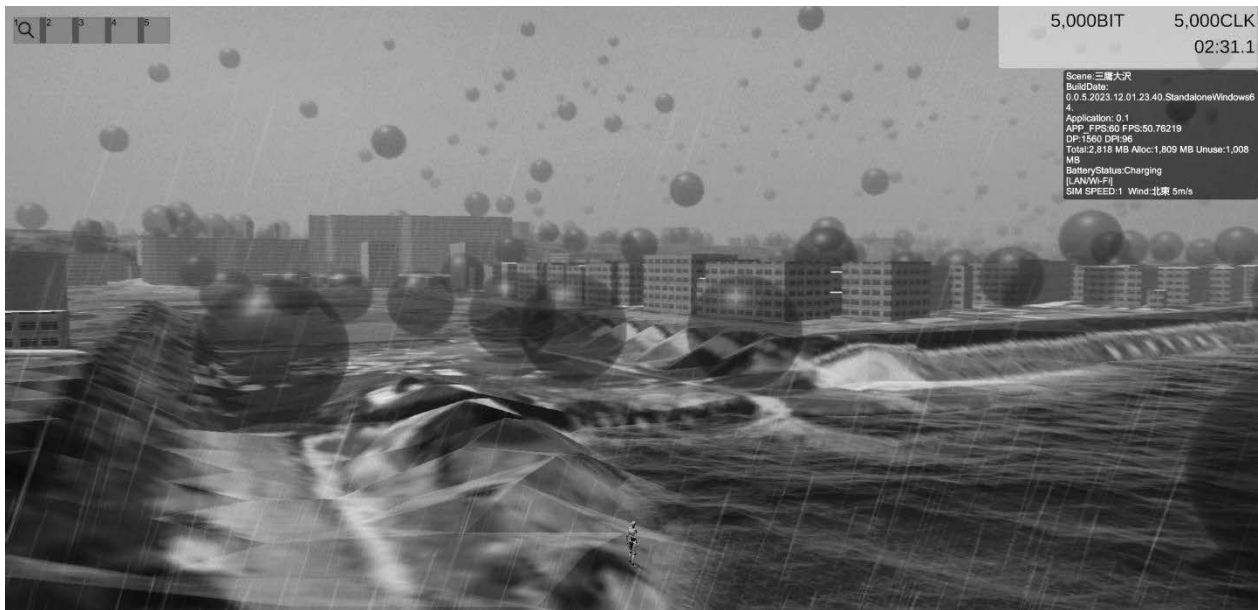


図 21 大沢調節池、第二貯留池側の方が水没していることがわかる。標高情報では第一貯留池側のほうが若干高くなっている

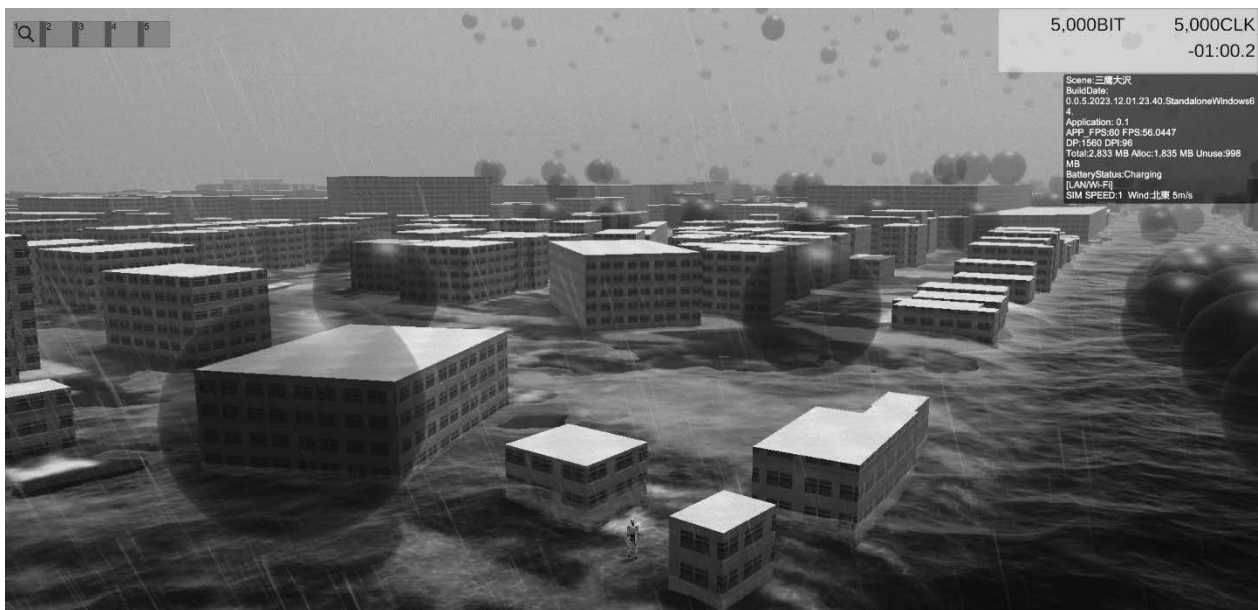


図 22 大沢第二調節池が稼働する 2m 上昇時には下流部の御塔坂橋近辺では腰高まで浸水している

5 研究課題別の考察と結論

5.1 シミュレーション技術を用いて、課題対策をどのように定量化、可視化ができるか？

可視化が比較的容易な火災や水害といったものから取り組んだという面もあるが、課題についての視認性は従来の手法より向上したものと考える。しかし、一目視認性が難しい課題などは、どのように抽象化するかなど

を含め、課題ごとにどのような数理モデルに落とすか設計を行う必要があり、これは課題ごとに深耕せねばならず容易ではないことが予見された。

定量化については、環境の複雑性を保持するために多変量な変数を内包したままにしたので、単一軸での評価実現は困難となった。スコアリングシステムなども導入はしたが、これが課題対策の定量化として機能しているかの妥当性は乏しく、課題として残ることになった。しかし、ゲームとして出題者と回答者が増えることによりいずれかのパラメータが統計的な有意に到る可能性は残しているものと考ええる。

5.2 シミュレーションモデルの精度をどのように継続的に向上させることができるか？

研究手法においても説明を入れたが、オープンデータなどの公開情報の継続収集や更新、また独自のセンシングによるデータ収集がより重要になるであろうことは予見可能な範囲である。演算力が向上し、機械学習やLLMなどのモデルの進歩もほぼ確実ななかで、それらを活用できるか否かは、その地域のデータの機械判読性の難易やデータの粒度の一貫性、網羅性、連続性がどこまで担保されているかに掛かっている。

今回の研究では継続更新で精度をあげることを機能や仕組みとしては作り込めなかったが、疎結合化による更新容易性の向上という設計思想には盛り込むことができた。

5.3 シミュレーション上で作成された計画の有効性をどのように評価できるか？

課題やハザードの概念を抽象化し、ゲーム内の敵ユニット、またその解決策を自分ユニットとして自由配置できるようにして、攻防することで課題の単純化をおこなった。課題の設定や抽象化が正鵠を射ているかはユーザー作成可能なものとすることで回避策を設けたが、これらが機能するかは実際に利用され外部評価を得た後に判断する必要がある。本研究中では到達しなかったため、仮説の自己検証の範囲に留まっている。

5.4 地域特性に応じたモデル構築と、汎用性と特殊性のバランスを取ることができるか？

従来のシミュレーションでは、火災シミュレーションと水害シミュレーションなどまったく異なる目的のものを同一プラットフォームで動かすというようなことはできなかったため、シミュレーション技術の汎用化には一定成果があったものと考ええる。他方、特殊性を抽象化したユニットをデザイン、モデル化するにはその分野や地域について相応の調査と専門性が不可欠であることがわかった。

5.5 提案する手法は、従来の都市計画・防災計画手法と比較して、どのような改善をもたらすか？

都市計画分野では実験科学的な比較検証や追証が困難であるため、計画の実行前に正確にその成果を広く共有することも、実行後に定量的な価値評価を行うことも困難であった。これらは、要件定義段階で情報理解や課題感に齟齬が生まれることや、主観的で声高な少数意見の影響を強く受けすぎ、結果として静かな多数派の意向や利便性とは逆のものになる可能性を排除することはできないなど、プロジェクト管理でもよく知られる既知の問題によるものである。都市計画では開発の単位が長くなるため、柔軟な修正や改善が行い難い。さらには貨幣換算が困難なもの、時間粒度によって利害が衝突するもの、リスク受忍をせざるをえないものについてはその評価解釈が異なるため、合意形成において利害調整が必要となり、まちづくりを困難なものにしてきた。

今回の手法は、計算科学的手法により実際の街では困難であった実験科学的な比較検討を可能にするものであり、かつそれぞれの課題意識に基づき仮説の設定がおこなえる汎用的なシミュレーションであるので、言語化や文章化といったバーバルスキルだけに依存しない手法となる。既存の手法に対して排他的なものではないので、新たな軸としての問題定義の伝達、計画の共有方法、評価方法となる可能性があるのではないかと考える。

6 研究で得られた知見ならびに行政への提言

本研究で開発した 3D 都市モデルとシミュレーションプラットフォームは、従来の都市計画におけるシミュレーションのように高価なスーパーコンピュータなどを必要とせず、汎用的な PC での実行が可能な点、専門知識を持たなくとも直感的に操作できる点において、大きな優位性がある。

本シミュレーションプラットフォームの特徴として、プログラムの再構築を必要とせずにシナリオや環境変更が可能な点、プレファブ化による容易なステージ追加導入が挙げられる。大規模火災、水害など全く異なる複数モデルの実験を同じシミュレーション空間上で実行できることもこれに由来する。これらの特徴により柔軟な地域特性に応じたシミュレーションの実用への展望は明るいといえることができる。

6.1 期待される効果

多変量なシミュレーションと複数のシナリオに基づく予測が可能となり、具体、再現性を持つ政策決定支援ツールとしての有効性が期待される。利用者を限定したシミュレーションではないので、インフラ配置や災害対応について、地域の実情に明るい当事者がより具体的にシミュレーションに取り組むことができる。当事者性とゲーミフィケーションを活用した市民参加型アプローチにより、従来のハザードマップや文書による説明では克服が困難だった安全バイアスの解消に貢献できる可能性がある。

これらのシミュレーション結果は多くの人が統計的再現性を持って共有することが可能なものであるために、より具体性に基づいたデータ駆動型のまちづくりが今後は行なわれることが期待される。

6.2 今後の展開と課題

本研究では対策ユニットを配置した実例研究までは行えなかったが、対策ユニット配置を含めたシミュレーション実行結果収集による現実社会への反映が期待される。特に、市民参加型ハンズオンワークショップの開催やゲームとしても配布することで、より多くの人たちに使用してもらうことが、それを利用者した人たちの防災意識の当事者性向上や安全バイアスからの脱却に繋がるものと考えている。

次なるケースモデルとして、街頭消火器の戦略的配置、Wi-Fi HaLow の最適配置、将来の人口動態を考慮した空き家対策、防災ステーションと避難経路計画のシミュレーション効果測定、自動運転ミニバスのバス停配置や巡回シミュレーションなどのモデル導入を検討している。

オープンデータの利用や収集については課題も多く、データの継続的再収集のサイクルをいかに機能させるかについては今後の課題となった。どのようなデータがより価値をもつかについては、より広範な都市課題への試行錯誤と、試行錯誤の結果をいかに定量的にデータ化できるかに依存する。精細なデジタルツインでのシミュレーションにより、まちづくり課題をより具体的に共有できるようになれば、データ駆動型まちづくりが実現するものと期待する。

7 補論

本システムとして、なぜそのようなメカニクスを採用したのかについて、特にまちづくりについて有用そうである部分については下記に目論見をまとめる。本シミュレーションプラットフォームはタワーディフェンスゲームとして開発し広く配布しようとしている側面があるのでそれについて補足する。

7.1 タワーディフェンス型ゲームメカニクス設計と実装

タワーディフェンス型ゲームメカニクスは、詰将棋やチェスのチェックメイトのような古典的なボードゲームの戦略性を現代的に再解釈したコンピューターゲームのジャンルである。似たジャンルに攻め手側の資源奪取を行うストラテジーゲームもあるが、地震や火災などの災害を想定した場合、災害に攻め手として取り組んでも完全防除は行えないために、今回は防衛側のディフェンスゲームを採用した。

タワーディフェンスゲームでは攻城防衛戦の概念を基に、敵味方の構造を定義し、攻め込んでくる敵ユニットに対して檣に兵種の戦略的配置をして、敵の侵入を防ぐことを重視する。このゲームデザインは、限られた資源に優先順位をつけ有効に配置する意思決定プロセスを必要とする。

一般的なこのジャンルのゲームではプレイヤーは倒した敵をコインなどのポイントに変換し、獲得したポイントで自ユニットを追加配置する。この動的なメカニクスは、資源管理と戦略的思考を要求し、継続的な意思決定を迫る。敵を倒せないとゲーム後半につれ有利な局面にすすめることができなくなる。

本システムではインフラの初期費用と維持費用を区別する経済合理モデルに対応するため、このモデルに2系統の報酬系の組み込みを行った。インフラ資産の耐用年数は木造で14~15年、鉄筋コンクリート製で31~50年¹³⁾と多様であり、これらの要素を仮想空間でシミュレーションするためには、これまでの物価上昇¹⁴⁾のようにストックとフローの関連性を疎にしておく仕組みの導入が必要であった。具体的には、環境から取得できるポイントをコンピューター上でワークするメモリにたとえてBIT(ビット)、設備の正常稼働で得られるポイントをCPUなどの演算能力にたとえてCLK(クロック)と定義し、ポイントシステムの二項化を実施した。

プレイヤーは攻め込まれる災害などに対応するために、CLKを消費して自ユニットを配置する必要がある、CLKは防衛すべき街の建物などの施設から時間で得ることができる。建物はBITを消費することで修復修繕が行うことができ、災害ユニットに対応した時などの報酬系としてBITを得ることができる設計とした。

7.2 シリアスゲーム手法による災害・インシデントの模式化

シリアスゲーム手法は、現実の社会課題や訓練目的を、ゲーム的アプローチを通じて効果的に学習・体験するための教育訓練技法である。この手法は複雑系にある自然環境における脅威や、関係変数の多い社会システムにおける脅威と防衛の関係を模式化し、リスクヘッジとアセスメント、ダメージコントロールの思考を促進し、手順を確認する助けとなる。

具体的には、津波という自然災害に対しては、どのような被害が発生するのか想定検討を行うことで、被害を最小限に抑える手順を確認学習する。火災という脅威に対しては、出火場所の想定や、消火の手順などをシミュレーションし、刑法犯という社会的脅威に対しては、防犯カメラや警ら巡回による予防・抑止戦略というようにシナリオ立てて疑似体験をすることで迅速な対応能力を養成できる。

従来、このようなシリアスゲームでは発生と防除に対して熟知したエキスパートが、ロール(役割)を決め模擬訓練が行うため、より精緻な模擬訓練を行うには多くの人の協力を得ずには成立しないものである。

しかし、高精度3D都市モデルとAR/VR技術の進展により、没入型トレーニング環境が実現しつつある現代においてシリアスゲーム手法は、机上の訓練を超え、疑似体験を通じた実践的な学習を可能にし、個人や組織の危機対応能力を効果的に向上させる可能性を秘めている。

7.3 疎結合設計とゲーミフィケーションによるフィードバックループ

本システムでは、舞台となる街というステージの構築、インシデントの模式化や報酬系などのゲームメカニクス、何がおこるかの進行シナリオをそれぞれ疎結合なものとして設計を行った。従来のシミュレーションやゲームでは、ステージとシナリオは不可分なものであるために、些細な変更でも全体への影響を再評価せねばならな

かった。

しかし、ステージは PLATEAU によるインポート処理による構築、シナリオは YAML 形式^{1 5)} による外部ファイル化によりユーザーが変更を行えるようにした。それぞれが独立した変更に対応できるようにしたこと、より都市空間情報の更新や地域特性に応じた災害種の変更、現実の地域に応じた準備状況などに即したシナリオ作成が柔軟に対応できるようになっている。

ここで、シミュレーション環境の構築と、報酬系の分離、シナリオの密結合をやめ、できるだけ疎に分離したのは、現実空間とシミュレーション空間における繰り返しの効用を最大限に活用するためであり、ユーザージェネレーティブなプラットフォームとして多くのプレイヤーによる試行回数を獲得するためでもある。ステージ設計と発生シナリオが疎結合であることで、プレイヤー数が十分に確保できなくとも、チェスや囲碁のように AI による強化学習のような人間以外による試行も設計上は可能となる。

まちづくりをゲーミフィケーションの対象とすることで、仮想空間と現実世界の間に双方向のフィードバックループ創出を意図している。

- ・収集されたデータを仮想空間に反映し精細な都市を再現
- ・想定しうるシナリオを共有しゲームとして体験
- ・結果を蓄積分析し、今後必要な対策や不足しているデータを定量化

これらの繰り返しサイクルを通じて、シミュレーション環境は継続的に最適化され、学習と改善のメカニズムを提供する。この一連のアプローチにより、都市防災や社会課題解決における学習・分析手法を継続的に更新していくことが可能となる。

謝辞

本論文の作成にあたり、多大なるご指導とご協力を賜りました大正大学地域創生学部准教授 仲北浦 淳基先生、国際基督教大学名誉教授 西尾 隆先生、国際基督教大学教養学部アーツ・サイエンス学科助教 千 仙永先生に心より感謝申し上げます。また、貴重なアドバイスをいただきました宇山 陽子アドバイザー、フィールフィジックス植田 達郎氏、そして本論文の作成を支援していただきました三鷹ネットワーク大学事務局の皆様にも厚く御礼申し上げます。箇条書きのマークダウンからの日本語化に多いに貢献してくれた `claude.ai`、そしてプログラミングのお供、`github copilot` にも感謝申し上げます。

[注]

- 1) 国土交通省、PLATEAU About Plateau、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、<https://www.mlit.go.jp/plateau/about/>
- 2) 国土交通省、PLATEAU TOPIC 3 | 3D 都市モデルデータの基本[1/4] | 3D 都市モデルの入手方法とデータ形式、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、<https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-1/>
- 3) 一般社団法人 社会基盤情報流通推進協議会、G 空間情報センター、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、<https://front.geospatial.jp/>
- 4) 株式会社構造計画研究所、火災による延焼予測・構造物への影響評価シミュレーション 火災の延焼予測モデル、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、<https://kaiseki-kke.jp/consulting/earthquake/page08.html>
- 5) 国立研究開発法人 建築研究所、防火研究グループ 上席研究員 林 吉彦、延焼シミュレーションモデルの構築、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、<https://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h16/txt/03-2.pdf>
- 6) 東京消防庁、測定手法及び延焼シミュレーションの概要、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、<https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/learning/clib/enshoukiken/chapter04.html>
- 7) 国土交通省、糸魚川市の大規模火災(平成 28 年)について、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、<https://www.mlit.go.jp/common/001188855.pdf>

- 8) Bloomberg、2025 年 1 月 12 日 米ロサンゼルス近郊の山火事 最大風速が時速 50 マイル (約 80.5 キロメートル) 約 22m/s、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、<https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2025-01-13/SPZXCLT1UM0W00>
- 9) NHK、大船渡の山林火災 10 棟の住宅に延焼 夜を徹して消火活動、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、<https://www3.nhk.or.jp/lnews/morioka/20250226/6040024516.html>
- 10) 京都大学名誉教授 日本火災学会会長 堀内 三郎、市街地火災の延焼予測について、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、https://www.isad.or.jp/pdf/information_provision/information_provision/no15/3p.pdf
- 11) 内閣府防災担当 第 3 回 災害から文化遺産と地域をまもる検討委員会、地震災害から文化遺産と地域をまもるための対策マニュアル(素案) 平成 16 年 4 月 21 日 参考 3. 延焼シミュレーションの具体例、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、<https://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h16/pdf/sankoushiryō3-3.pdf>
- 12) 三鷹市、浸水履歴、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、https://www.city.mitaka.lg.jp/c_service/108/108291.html
- 13) 国税庁、主な減価償却資産の耐用年数表、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、https://www.nta.go.jp/taxes/shiraberu/taxanswer/shotoku/pdf/2100_01.pdf
- 14) 内閣府、内閣府ホーム 経済財政政策白書等 (経済財政白書、世界経済の潮流等) 平成 24 年度年次経済財政報告 長期経済統計目次 物価、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je12/h10_data05.html
- 15) IBM. Tasmih Khan, Michael Goodwin. YAML とは何か、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、<https://www.ibm.com/jp-ja/topics/yaml>

[文献]

- 国土交通省、PLATEAU TOPIC 1 | 3D 都市モデルでできること[2/2] | 3D 都市モデルの特徴と活用法 図 1-7 LOD による詳細度の違い 閲覧日：2024 年 3 月 8 日、<https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc01-2/>
- 国土交通省国土地理院、日本全国の陰影起伏図、閲覧日：2024 年 3 月 8 日、
https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/release_thematic_maps_20180606.html
<https://maps.gsi.go.jp/#15/35.673736/139.534822/&base=std&ls=std%7Chillshademap&blend=0&disp=11&lcd=hillshademap&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m>
- 白鳥和人、筑波大学大学院システム情報工学研究科ら、シリアスゲーム、閲覧日：2024 年 2 月 27 日、
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsai/23/1/23_79/_pdf
- 東京都 建設局、水害リスク情報システム「浸水実績図」のページへ、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、
https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/river/chusho_seibi/panhulink/kako
- 東京都 建設局、野川大沢調節池 (野川)、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、
<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/kensetsu/000046139>
- 東京都 下水道局、野川・仙川・入間川・谷沢川及び丸子川流域 浸水予想区域図 (改定)、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、
<https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/living/amesh/inundation/nogawakaisei>
- 東京都 水害リスク情報システム 浸水実績図、<https://www.suigai-risk.metro.tokyo.lg.jp/shinsui/jisseki/main.html>
- 東京都 不燃化ポータルサイト、防災都市づくりに関する地域等、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、
<https://www.arcgis.com/apps/instant/sidebar/index.html?appid=5f59f9b5b9da427b8f4e9ecd88c83022>
- 東京都 不燃化ポータルサイト、防災都市づくり推進計画、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、
<https://www.funenka.metro.tokyo.lg.jp/promotion-plan/>
- 三鷹市、三鷹市浸水ハザードマップ、閲覧日：2024 年 2 月 28 日、https://www.city.mitaka.lg.jp/c_service/034/attached/attach_34182_1.pdf

[参考文献]

- 国土交通省大臣官房技術調査課公共事業調査室、2024、「令和 6 年度 第 2 回 公共事業評価手法研究委員会資料」、閲覧日：

2024 年 5 月 11 日、<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001751984.pdf>

興石彩花、後藤智香子、新雄太、矢吹剣一、吉村有司、小泉秀樹、2022、「日本における住民参加型まちづくり手法としてのオンラインプラットフォーム「Decidim」の活用実態」『公益社団法人 日本都市計画学会 都市計画論文集』57(3): 1355-1362。

松本多恵、2014、「ゲーミフィケーションとシリアスゲームの相違点について」『情報の科学と技術』64(11):481-484。

渡辺公次郎、近藤光男、2009、「津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発」『日本建築学会計画系論文集』74(637): 627-637。

Aleksandra Solinska-Nowak, Piotr Magnuszewski, Margot Curl, Adam French, Adriana Keating, Junko Mochizuki, Wei Liu, Reinhard Mechler, Michalina Kulakowska, Lukasz Jarzabek, 2018, "An overview of serious games for disaster risk management – Prospects and limitations for informing actions to arrest increasing risk." 『International Journal of Disaster Risk Reduction』31: 1013-1029.

Anjali Katare, Jeewasmi Thapa, Matthew Malecha, Siyu Yu & Philip Berke, 2023, "Plan integration and plan quality: combining assessment tools to align local infrastructure priorities to reduce hazard vulnerability." 『Adaptive Planning for Sustainability and Resilient Infrastructure』8(4): 359-374

Nayomi Kankanamge, Tan Yigitcanlar, Ashantha Goonetilleke, Md. Kamruzzaman, 2020, "How can gamification be incorporated into disaster emergency planning? A systematic review of the literature." 『International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment』11(4): 481-506.

Philip R. Berke, Ward Lyles, and Gavin SmithView, 2014, "Impacts of Federal and State Hazard Mitigation Policies on Local Land Use Policy." 『Journal of Planning Education and Research』34(1): 60–76.

Rania Rizki Arinta, Suyoto, Andi W.R. Emanuel, 2020, "Effectiveness of Gamification for Flood Emergency Planning in the Disaster Risk Reduction Area." 『International Journal of Engineering Pedagogy』10(4): 108-124.

プロフィール

倉林 俊成（くらばやし としなり）

三鷹生まれ。2006 年に個人商店を創業し商店街の活動をはじめたため、まちづくりに強制参加。テクノロジー界限と三鷹が村だった祖父の代からの数世代にわたるオールドエコノミー界限をなんとかして融合して、住みよい街にできたらと、のんびり紅茶を飲んでいる。三鷹南銀座会 役員。三鷹 ICT 事業者協会 会長。
