

津波避難要因の発見のための進化的実験計画法開発

○内種岳詞（神戸大学） 周晨婷 畠中利治（大阪大学）

概要 津波避難シミュレーションは、被害の再現や対策の再検討に利用される一方、未知の場所での被害悪化を防ぐためにも利用される。後者は前者と比較して、考慮すべき要因の絞り込みが困難で、多数の要因組み合わせを検討しなければならない。そこで、要因を効率よく絞り込む手法として進化計算を応用した実験計画法を開発してきた。本発表では、これまでの成果をまとめるとともに、避難者属性など考慮すべき要因について再検討する。

キーワード: 津波避難シミュレーション, 進化計算, 実験計画

1 はじめに

津波などの自然災害に対する防災・減災を実現するために、計算機シミュレーションの利用が検討されている。シミュレーションによって得られる結果より、物理的な被害だけでなく人的被害の軽減も期待される。一方で、そのような結果を得るためのシミュレータやその利用方法の開発が不可欠であり、過去に発生した災害をより正確に再現するようにシミュレーションの精度を向上したり、未知の災害を想定した被害予測のために様々な条件を想定したシミュレーション結果の比較が実施されてきた^{1, 2)}。しかし、過去の災害から得られた教訓や対策が、別の種類の自然災害や別の地域で有効であるとは、必ずしも言えない。また、避難などが関わる現象の予測は想定すべき要因が多く、想定外の自体が起こらないように条件を網羅することは難しい。そのため、これまでのシミュレーションによって、重要なシナリオが十分に検討されているとは言えない。

社会シミュレーションより現象の要因を探るためには、より多くの要因を扱えるシミュレータの開発が必要なのと同時に、膨大な数のシナリオに対してシミュレーション実験を行い、結果を比較する必要がある。なぜなら、より最悪のケースを探し出すためには、結果の比較からより重要な要因を探し出す必要があるからである。しかし、1シナリオのシミュレーション実験に要する時間は短くなく、全てのシナリオの組み合わせを現実的な計算時間で実験することはスーパーコンピュータを利用しても実現困難である。より重要な要因を探し出すため、特に重要であると期待されるシナリオを選択する枠組みを作る必要がある。これらの背景より、著者らは、進化計算にヒントを得た確率的探索によって重要な要因を探し出す「進化的実験計画法」の開発に取り組んできた^{3, 4, 5, 6)}。

本稿では、金沢地方における津波避難シミュレーションを例に、要因を探し出すのに必要なコストと発見された要因について紹介する⁷⁾。そして、膨大な実験条件数が想定されるシミュレーション結果の比較をより賢くおこなうため、著者らが取り組んできた進化的実験計画法の枠組みについて紹介する⁶⁾。最後に、避難の文脈において、考慮されていなかった人間の避難特性について言及し、その影響について考察する。

2 金沢津波避難シミュレーション実験⁷⁾

金沢市大野町 (Fig. 1) の津波避難において避難時間に影響を与える要因が推定された⁷⁾。この地域は、日本海沖地震による津波のリスクがあり、有事には迅速

な避難が求められる。しかし、避難経路の橋が通れないことや、道が雪で覆われて移動が困難となることが予想される。Fig. 2 は金沢市大野町で実施された逃げ地図ワークショップ⁸⁾で検討された通行不可能になる可能性のある橋11箇所と雪で移動が困難となると予想される道11通りが示されている。避難に要する時間は、利用可能な避難経路による影響を受ける。影響の大きさを見積もることができれば、避難時間に大きな影響を与える橋を補強したり、除雪対策を行い、迅速に避難を完了できる可能性がある。避難時間は、これらの経路の利用可否を条件にマルチエージェント歩行シミュレーションから推定された。しかし、橋11本の通過の可否と雪道の除雪の有無の組み合わせ数は 2^{22} (約419万)通りとなり、シミュレーション実験でさえ網羅的に実行することは難しい。ちなみに、市販の計算機 (Xeon 3.1GHz) のシングルプロセスでシミュレーション実験を行うと、1組あたり約4分で、全組み合わせでは約11650日必要であった。なお、避難者が最短経路を予め知っているなど、単純化した人の移動モデルを利用したことで実行時間がすでに大幅に削減された上での見積り時間であることに留意されたい。

このように、これまでに推定できなかった規模の災害対策における評価が求められている。爆発するシナリオの組み合わせに対し、超並列計算機の利用によって、網羅的な計算を可能にする方法がある。一方で、網羅的なシナリオの組み合わせを網羅的に評価せず、重要なシナリオを効率よく発見する方法を開発することも重要な課題である。そのため、本研究では重要なシナリオを探索する進化的実験計画法を開発を進めている。



Fig. 1: NIGECHIZU SIMULATOR developed by AIST and the target area of tsunami evacuation simulation, namely, Onomachi, Kanazawa, Ishikawa Prefecture, Japan



Fig. 3: Relationships between O(H) and its sample variance are shown for $D = 8$



Fig. 4: Relationships between O(H) and its sample variance are shown for $D = 16$

$schema = "*0***000"$ より小さくなる.

3.2 アルゴリズム

モデルに関する事前知識なしに、より良いデザインを獲得する最良の方法は存在しない。そこで、より良いデザインを探す一般的な手法が必要となる。ここでは、確率的な探索を繰り返すことにより、より良いデザインを獲得するアルゴリズムを提案する。提案したアルゴリズムは以下手順で実施される。

1. * の数が 1 の初期パターンの生成 (集団サイズは ${}_D C_1$ となる)
2. $schema$ からシナリオを生成し結果の標本分散 $V(Y)$ を評価
3. $V(Y)$ の値に基づき新しいユニークな $schema$ を生成し、悪い $schema$ を淘汰する
4. 終了条件を満たすまで、 $schema$ の評価・生成・淘汰を繰り返す

新しい $schema$ は、2つの親 $schema$ の交叉と突然変異によって生成される。 $schema$ の分散の評価に基づき、親と成る $schema$ をトーナメント選択 (トーナメントサイズ 2) する。生成された $schema$ の要素の値は、それぞれ親の $schema$ のどちらかの値から確率的に選択される。よって、生成された $schema$ の order は、親の order より増減する。また、交叉だけでは、どちらの親 $schema$ にも * の存在しない場所には新しく * は生成されない。生成されたパターンの各遺伝子座には、突然変異がある確率 (MR) で起こり * に変化する。

4 初期集団生成方法の一般化⁶⁾

これまで、初期集団に含まれる $schema$ の order は、1 を仮定してきた。なぜなら、金沢津波避難の分析結果も、式 (1) で定義したシステムモデルも 2 変数間の交互作用までを考えており、より高次の交互作用が存在することを考慮していないからである。しかし、一般的なシステムモデルは、高次の交互作用を含んでいる可能性がある。その場合、初期集団に order が 2 以上の $schema$ が含まれていた方が探索速度の点で有利である可能性がある。しかし、order が 2 の $schema$ は、 ${}_D C_2$ 通り存在し、その全てを初期集団に含めることは、実験数の増加から好ましくない。そこで、order が 2 以上の $schema$ も確率的に発生するように初期集団生成方法を提案する。

4.1 確率的初期集団生成方法⁶⁾

初期集団を以下の手順で生成する。

1. 長さ D かつ order が 0 の $schema$ の要素をランダムに 2 回選択し * に置換する。
2. 得られた $schema$ を初期集団に加える。
3. 初期集団のサイズが規定値に達するまで、1. から 2. を繰り返す。

5 数値実験^{6, 9)}

初期集団サイズがシステムモデルの次元数 D に依存しないように、初期集団の生成方法を確率的にした。そのため、初期集団サイズ pop は ${}_D C_2$, $\frac{1}{2} \times ({}_D C_2)$, $\frac{1}{4} \times ({}_D C_2)$ の 3 通りを試みる。なお、突然変異確率は、 $1/2000$ とした。

Fig.5,6,7,8 に $D = 16$, Fig.9,10,11,12 に $D = 24$ で得られた $schema$ の分散と実験数 (# of y) の世代推移をそれぞれ示す。ここで、 $D = 16, 24$ のシステムモデルは式 (1) であり、 $D = 22$ のシステムモデルは、金沢の津波避難シミュレーションである。また、それぞれのシステムモデルにおいて、4つの図が示されており、上より既存手法 $pop = {}_D C_2$ ³⁾, 提案手法 $pop = {}_D C_2$, 提案手法 $pop = ({}_D C_2)/2$, 提案手法 $pop = ({}_D C_2)/4$ にそれぞれ該当する。

既存手法と同じ集団サイズでは、それぞれのシステムモデルにおいて、利用されたユニークなシナリオ数 (# of y) がほぼ等しい値まで上昇した。一方で、集団サイズを制限することにより、# of y の値はより小さい値で増加を鈍らせた。これらのことより、より大きな集団サイズは実験数の増加を招くことが明らかとなった^{?)}。

金沢津波避難シミュレーション結果に対して、提案手法を適用したときに得られた重要な要因の一例を Fig. 13 および Fig. 14 に示す。Fig. 13 は、全シナリオのシミュレーション結果に対して 2 要因交互作用までを考慮した重回帰分析結果から重要であると判定された要因である。Fig. 14 は、初期世代数を $pop = \frac{1}{2} \times ({}_{22} C_2)$ 、突然変異率を $MR = \frac{1}{500}$ とした提案手法のシミュレーション結果から得られた重要な要因である。総シナリオ数が 2^{22} なのに対し、提案手法は 7 世代目で約 5200、10 世代目で約 8000 であり、全体の約 0.2% 以下の実験数であるにもかかわらず、重要な要因のみを発見できている⁹⁾。

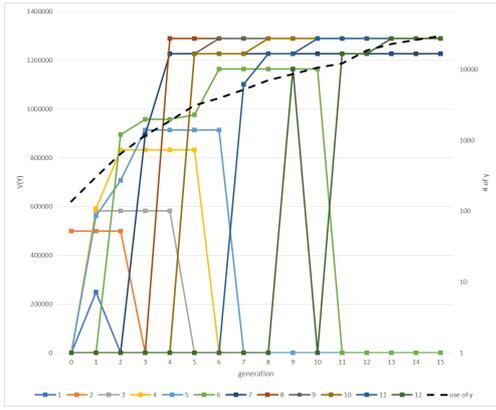


Fig. 5: $pop = 16$ $C_2 = 120$, conventional

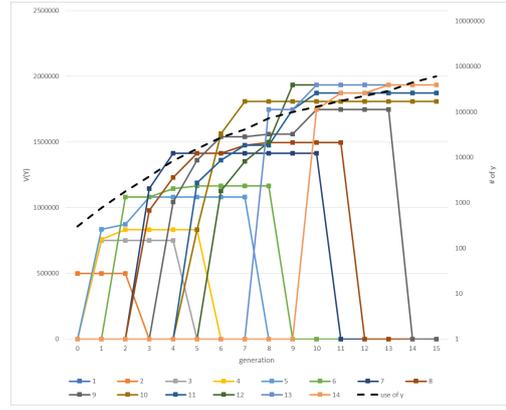


Fig. 9: $pop = 24$ $C_2 = 276$, conventional

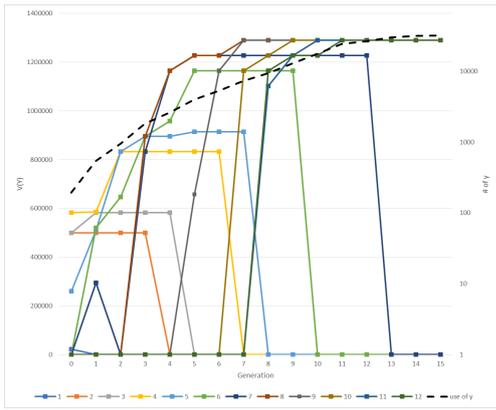


Fig. 6: $pop = 16$ $C_2 = 120$, random generation

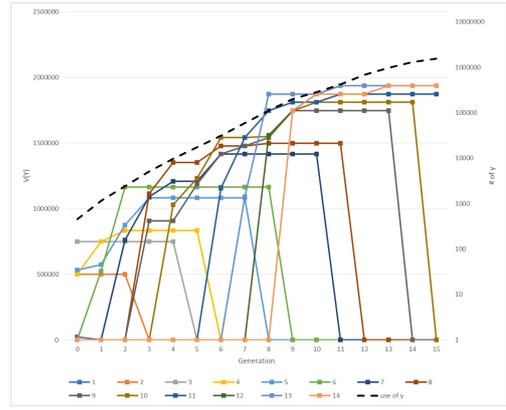


Fig. 10: $pop = 24$ $C_2 = 276$, random generation

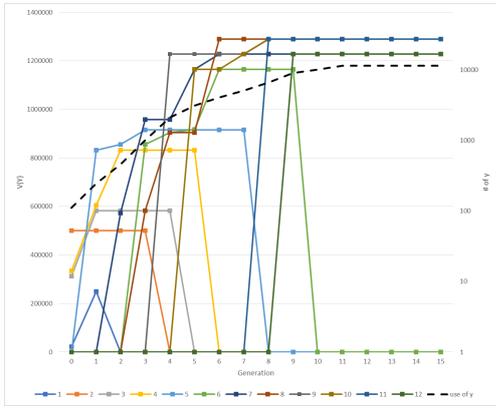


Fig. 7: $pop = \frac{1}{2} \times (16C_2) = 60$, random generation

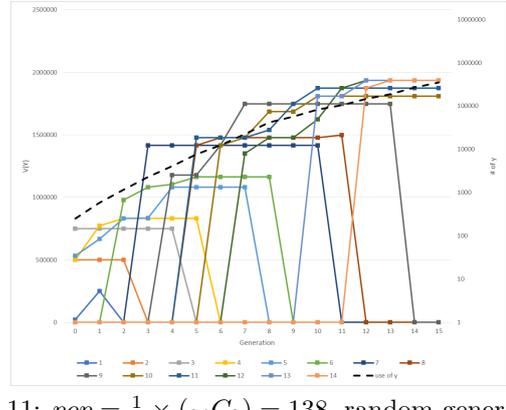


Fig. 11: $pop = \frac{1}{2} \times (24C_2) = 138$, random generation

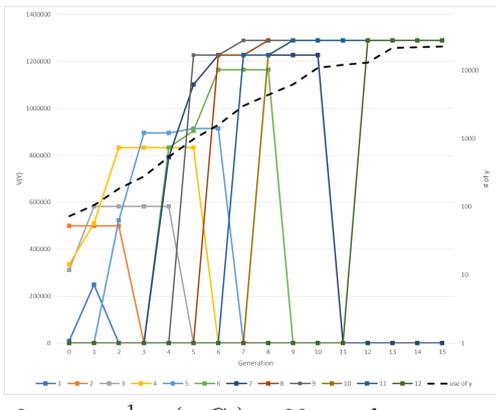


Fig. 8: $pop = \frac{1}{4} \times (16C_2) = 30$, random generation

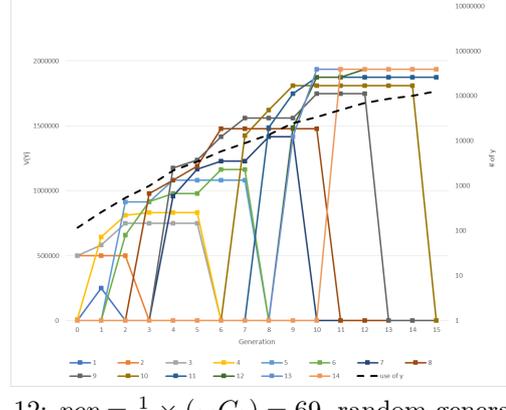


Fig. 12: $pop = \frac{1}{4} \times (24C_2) = 69$, random generation

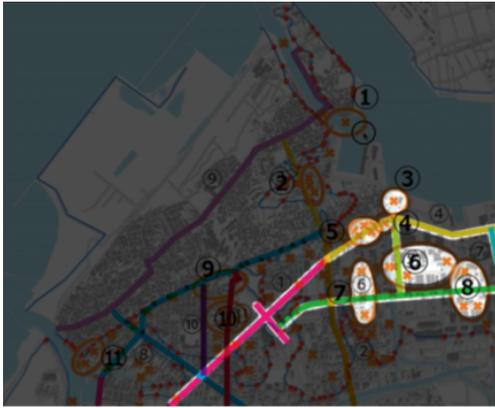


Fig. 13: Pasways which were found in previous research

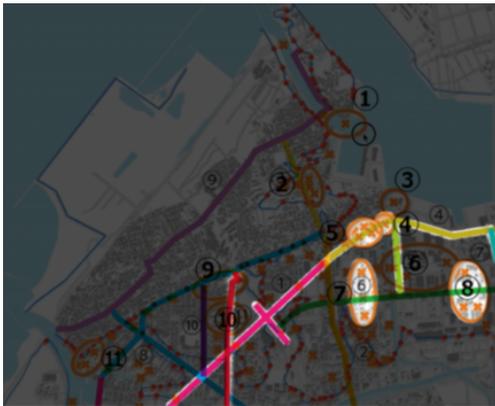


Fig. 14: Pathways which were found in proposed method

6 人間の避難の特性に関する考察

金沢津波避難シミュレーションでは、地域に住む住人のみを対象としたが、仕事・通学や観光など人の活動によって人数や人口分布は異なってくる。また、避難する人の属性が避難時間に与える影響は少なからず存在すると考えられる。実際の災害においても、避難を速やかに開始しない人が存在することや、避難に救助者を必要とする方の存在など、個々人の避難の時間を見積もることは困難である。しかし、現実と乖離したシミュレーションから得られた結果では、地域に住む住人からも、避難誘導や救助に当たる消防員も理解を得難い。本研究で示した、多くの要因を取り扱う手法は、人の属性のような要因を扱えるシミュレーションでこそ必要だと言える。今後、人の属性をも考慮に入れたシミュレータを利用して、防災・減災の評価や対策を進めていきたい。

7 おわりに

金沢における津波避難シミュレーションを例に、被害を悪化させる要因をより少ない実験数で発見することを目的とした進化的実験計画法について紹介した。その結果、総シナリオの約0.2%の数の実験から、重要な要因のみを発見できることが示された。しかし、自然災害の防災・減災を達成するためには、人の属性を考慮に入れたシミュレーションを実施する必要がある。ポスター発表では、自然災害からの避難の文脈において、人の属性が避難にどのような影響を与えるかを議

論する。

参考文献

- 1) E Mars, A Suppasri, F Imamura, S Koshimura: *Agent-based Simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake/Tsunami Evacuation: An Integrated Model of Tsunami Inundation and Evacuation*, Journal of Natural Disaster Science, 34(1), 41/57, (2012)
- 2) H. Taubenböck, N. Gdrnerg, G. Lmmel, and et al : *“Last-Mile” preparation for a potential disaster Interdisciplinary approach towards tsunami early warning and an evacuation information system for the coastal city of Padang, Indonesia*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1509/1528,(2009)
- 3) Takeshi Uchitane, Chenting Zhou, Toshiharu Hatanaka: *Applying Evolutionary Design of Experiments to Sensitivity Analysis of Tsunami Evacuation Simulation*, proceedings of NOLTA2016, 538/541, (2016)
- 4) 内種岳詞, 周晨婷, 畠中利治: *進化的実験計画法における実験数と感度分析精度の関係*, 第 11 回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会講演論文集, 73/77, (2017)
- 5) 内種岳詞, 周晨婷, 畠中利治: *進化的実験計画法における突然変異オペレーション改善の一考察*, 第 13 回進化計算学会研究会資料集, 31/36, (2017)
- 6) 周晨婷, 内種岳詞, 畠中利治: *進化的実験計画法における初期個体の生成方法が実験数に与える影響調査*, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015 講演論文集, SS3-13, 506/511, (2017)
- 7) 内種岳詞, 山下倫央, 辻順平, 松島裕康, 野田五十樹, 伊藤伸泰: *避難シミュレーションへの進化計算適用結果の分析*, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015 講演論文集, SS3-18, 664/646, (2015)
- 8) 逃げ地図プロジェクト: <http://www.nigechizu.com/>
- 9) C. Zhou : *Applying Evolutionary Design of Experiments to Sensitivity Analysis of Tsunami Evacuation Simulation*, Osaka University Master Thesis, (2018)