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 人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だすためには、結果 の比較からより重要な要因を探しだす必要があるから である. しかし、1 シナリオのシミュレレーション実 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、要因を探しだ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 2²² (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 ナリオをを探索する進化的実験計画法の開発を進めて いる.



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



Fig. 2: Locations of eleven bridges with potential to be broken and eleven roads with potential to be covered with deep snow are shown

3 進化的実験計画法^{3,4,5,6)}

3.1 2変数交互作用を考慮したベンチマーク問題

進化的実験計画法は、たとえば感度解析などを適用す るシナリオ集合を適切に選択する手法である.従来の実 験計画法は、実験開始前に実験すべきシナリオ集合を決 定してから実験を実施するのに対し、本研究の手法では、 実験を進め得られた結果から動的にシナリオ集合を変 更する.ここで schema は、*0000000 *000000000000 のように0と*とで表現されるパターンとして定義さ れる.要素は、0か*のどちらかで、要素数はイベン トの数に等しい、たとえば、津波避難シミュレーショ ンでは、橋と道の合計数が22なので、要素数は22と なる.ここで、*はワイルドカードであり、0と1の両 方の状態を取る.すなわち、

0000000000000000 の schema からは,16 のシナリオ

1.	00	000000	00	000000000000000
2.	10	000000	00	000000000000
3.	01	000000	00	000000000000
4.	11	000000	00	000000000000
5.	00	000000	10	0000000000000
6.	10	000000	10	000000000000
7.	01	000000	10	000000000000
8.	11	000000	10	000000000000
9.	00	000000	01	000000000000
10.	10	000000	01	000000000000
11.	01	000000	01	000000000000
12.	11	000000	01	000000000000
13.	00	000000	11	000000000000
14.	10	000000	11	000000000000
15.	01	000000	11	000000000000
16.	11	000000	11	000000000000

が得られる.各シナリオの0または1は,たとえば, 津波避難シミュレーションで橋や道の通行可否に対応 している.そして,各シナリオは避難時間評価シミュ レーションの入力となり,対応する16通りの避難時間 がシミュレーション結果として得られる.よって,上 記の scema が獲得できれば,第1,2,9,10番目の主効 果および,それらの主効果の交互作用の影響度を重回 帰分析で評価できる.

より良いシナリオの集合は、実験数がより少なく、適 切な分析により重要な要因を発見できるものである. しかし、感度解析などの分析の確かさは、全シナリオ に対する分析を実施してみるまで比較できない.よっ て、良い schema の集合を見つけるためには、なにか しらの方法で schema の良さを評価しなければならな い.また、schema の*の数が少ないことはシミュレー ションを実施するシナリオ数が少なくてすみ、実験コ ストを削減できることを意味するが、*の数が少なす ぎると感度解析結果の確度は悪くなると考えられる. 進化的実験計画では、実験数の増加を抑え、感度解析 結果の確度を良くするために、schemaから得られるシ ナリオをシミュレーションで評価した結果の標本分散 を評価する.なぜなら、schemaから得られるシナリオ でシミュレーションした結果が大きく変動すれば、感 度解析の結果として大きな感度が得られる可能性が高 いと期待できるからである.よって、結果のばらつき を大きくする schema が実験計画に含まれるべきだと 仮定し、結果の標本分散の大きさで schema を評価す る.従って、発見すべき schema は、結果の標本分散 を大きくし、かつ、含まれる * の数が少ないものであ る.なお、ここでは schema に含まれる * の数を order と呼ぶ.

簡易的なシステムモデルは式(1)で与えられる.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{D} a_i x_i + \sum_{i=1}^{D} \sum_{j=i+1}^{D} b_{ij} x_i x_j$$

$$a_i = a_{i+8}$$

$$b_{ij} = b_{(i+8)(j+8)}$$

(1)

ここで, $a_0, a_1, \ldots, a_D, b_{ij}$ は定数のモデルパラーメタ で x_i はモデルの入力変数yはモデル出力,Dはモデ ルの入力変数の次元である. x_i は0または1の値が入 力される.Dとして,8の倍数を与える.モデルパラ メータの値はTable1に示す.式(1)では,入力変数の

Table 1: Values of coefficient in the equation (1)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
0	1500	1000	500	0	0	0	0	0
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
b_2	-1200	-	-	-	-	-	-	-
b_3	0	0	-	-	-	-	-	-
b_4	0	0	0	-	—	-	—	—
b_5	0	0	0	1000	—	-	—	—
b_6	0	0	0	0	0	-	—	—
b_7	0	0	0	0	0	0	—	—
b_8	0	0	0	0	0	0	0	-

次元数 D を 8,16,24 と与えることにより,容易に次元 数を増加させられる.また,2 種類の交互作用が明示 的に与えられる.1つは,主効果が存在する変数の組 み合わせにおける交互作用で, $b_{12} = -1200$ が対応す る.この交互作用は, $x_1 \ge x_2$ が同時に1になったと きにのみ影響を及ぼす.そして, $x_1 \ge x_2$ には,それ ぞれ主効果として $a_1 \approx a_2$ が影響する.一方で,主効 果が存在しない変数の組み合わせにおける交互作用で, $b_{45} = 1000$ が対応する.この交互作用は, $x_4 \ge x_5$ が 同時に1になった時にのみ影響を及ぼす.そして, x_4 $\ge x_5$ には,それぞれ主効果の影響がない.

Fig. 3 に D = 8, Fig. 4 に D = 16 のときの schema に対応した標本分散の大きさを order 別にそれぞれ示 す. 主効果も交互作用もないダミー変数 x_6, x_7, x_8 が 存在するため,それらの変数に * がある schema の分 散はそれらの変数に * がない schema と同じ評価にな る. シナリオ数を増やすことなく,より小さい ordre の schema を探すことが求められるので,たとえば, D = 8 において Fig. 3 における order が 4 で最大の 分散を示す schema="*0***000" を探すことが求めら れる.ちなみに, D = 8 のときに,感度分析を行う には, schema="*****000" が発見されることが望ま しいが, schema="*****000" の分散は,係数の影響で



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.

- * の数が1の初期パターンの生成 (集団サイズは DC1となる)
- schema からシナリオを生成し結果の標本分散 V(Y)を評価
- 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、 $_DC_2$ 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.
- 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 数值実験^{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 $_DC_2$, $\frac{1}{2} \times (_DC_2)$, $\frac{1}{4} \times (_DC_2)$ 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 $pop = (_DC_2)/2$,提案手法 $pop = (_DC_2)/4$ 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. 6: $pop =_{16} C_2 = 120$, random generation



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



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



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



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



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



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

- 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)
- 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回コンピューテー 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)
- 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)