

都市丸ごと統合災害シミュレーション

堀 宗 朗

都市丸ごと統合災害シミュレーションは、都市全体の災害と被害の過程を高い空間分解能と信頼度で数値解析する。大規模数値計算となるため、先端的な解析プログラムとその解析モデルの自動構築が中核技術となる。この二つの中核技術の開発が必要である。本稿は、防災研究の中の統合災害シミュレーションの位置付け、統合災害シミュレーションが目指す物理シミュレーションを概説した後、研究段階から実用段階へ進む統合災害シミュレーションの3つのユースケースを紹介する。

キーワード：自然災害、防災、統合シミュレーション、大規模数値計算、モデル自動構築

1. はじめに

風水害・地震・火山噴火といった自然災害は、戦役・疫病とならぶ文明の脅威であった。都市の崩壊で社会が壊滅に至る危険があったからである。高度化する都市では、災害がもたらす被害は、個人の生命から、都市の機能（通信・エネルギー・物流等）にまで拡大している。気候変動に起因して台風・高潮・洪水は激甚化の傾向にある。規模ならず頻度も増加するため、2024年の能登半島を襲った地震と水害のように、複数の災害が短い時間間隔で発生する災害の重畳を引き起こす確率が高まっている。

国土強靱化が象徴するように、災害に対する「事前の備え」は増強されている。しかし、事前の備えは、災害に対する無限の耐力を約束するものではない。事前の備えである耐力の増加に加え、近年は、被害発生後、より迅速な復旧を目指す「レジリエンス強化」も進められている。例えば、災害と被害の情報を国・自治体等で共有することで、災害対応がより効果的になるが、これはレジリエンス強化の一つである¹⁾。

想定された災害に対し、高い分解能と信頼度で都市丸ごとの被害を予測できるようになれば、事前の備えとレジリエンスの不備が抽出できる。計算機の進歩と都市のデジタルデータの集積は、災害と被害の全過程を数値解析する「都市丸ごとの統合災害シミュレーション」²⁾を実現しつつある。このシミュレーションが高分解能・高信頼度の災害予測の有効候補である。

上記を背景に、本稿は、最初に、都市丸ごと統合災害シミュレーションの防災研究の中での位置づけを説

明する。次に中核技術となる物理シミュレーションを担う解析プログラムと解析モデルを説明し、研究段階から実用段階へ開発が進められている統合災害シミュレーションの3つのユースケースを紹介する。

2. 防災研究

我が国は、大学・国研を中心に、風水害と地震を主な対象とした防災研究が継続的に実施されてきた。防災研究の継続の一因は、皮肉なことに、災害によって甚大な被害が発生すると、その被害を繰り返さないよう、防災研究に国費が投じられてきたことによる。

防災研究の全体像は、時系列で分けると理解しやすい。災害予測、被害軽減、被害対応という3つのフェーズである。被害の原因が、災害が予測できなかった、構造物が強くなかった、対応が悪かった、ということに対応している。我が国は、長年、第1のフェーズを重視し、気象・海象・地象の先端的な観測網が整備されてきた。第2のフェーズは構造物の耐力向上が目的となるが、この研究は民間に委ねる部分が多かった。第3のフェーズに関しては、近年、大型研究プロジェクトが進められている。3つのフェーズの基となる学術は理学、工学、社会科学であるが、その連携の意義が認識され、連携強化の研究プロジェクトが実施されてきた。

防災には発生数日前の準備も重要である。台風は1週間程度前から襲来の予測ができる一方、地震は日単位の発生予測は不可能である。前者はレジリエンス強化の被害対応の準備ができるが、後者は難しく、事前

の備えに頼む割合が大きい。準備ができる場合と不意を突かれる場合があるため、いわゆる総合防災は具体的な方法を見出すことは難しい。

防災の学術が理学・工学・社会学であること、災害準備ができる場合とできない場合があること。この二点は、防災研究のある種の制約である。計算科学を基とする都市丸ごとの統合災害シミュレーションは、第4の学術となって3つの学術の横串の役割を果たせること、異なる災害でも概ね汎用的に適用できること、という二つの理由から、この制約を緩めることが期待される。

横串役は特に重要である。各フェーズでの先端的な解析プログラムを共同開発することは連携の一つの形である。各フェーズで利用できる防災用の生成AIの開発も同様である。

3. 防災の物理シミュレーション

自然災害や構造物被害のシミュレーションは、統計的シミュレーションと物理シミュレーションに大別される。建物の被害推定を例にすると、統計的シミュレーションでは、過去の地震と被害のデータを基に、震度等のスカラー値から被害確率というスカラー値を推定する。物理シミュレーションは、0.01秒、100秒程度の3成分地震動から、構造物の多数の部材の応答をこの時間分解能で計算する。物理シミュレーションに必要な計算量が格段に大きいため、都市全体の被害推定には統計的シミュレーションしか選択肢がなかった。しかし、計算機の性能向上の結果、被害推定の物理シミュレーションは夢物語ではなくなっている。

(1) 解析プログラム

自然災害の物理シミュレーションは古典物理に基づく。ニュートンの運動方程式を基とする古典物理は連続体力学として体系化されており、数理的には初期値境界値問題に帰着し、この初期値境界値問題を数値解析で求めることが物理シミュレーションである。このシミュレーションはマルチスケールである。地震では地殻を伝播する地震波を考慮し、地盤と構造物の応答過程を0.01秒程度の時間分解能で解析する。風水害では列島の気象を考慮し、分単位での河川の増水過程を解析する。

マルチスケールという特性のため、防災の物理シミュレーションは必然的に大規模となる。地震の場合、スケールが大きい地殻内の地震波の伝播過程や、スケールが小さい地盤内の地震動の増幅過程に、1,000

万を超える未知数が計算される。世界最大規模の計算では未知数は10超のオーダーに達し、「京」や「富岳」のようなスーパーコンピュータの利用が必至となっている。

スーパーコンピュータの性能を活かすには、先端的な解析プログラムが必要である。現在のスーパーコンピュータは複数の計算機を同時に利用する並列計算が主流であるが、計算機の数进行倍にすると計算時間が半分になることが要求される。初期値境界値問題の数値解析でこの要求を満たすことは容易ではなく、高度なアルゴリズムの開発と実装が必要である。

(2) 解析モデル

防災の物理シミュレーションでは、解析プログラムの入力となる解析モデルが必要である。具体的には、建築建物やインフラ等の各種構造物の解析モデルであり、その数は10万から100万である。構造物に加え、河川・地盤等の自然環境に対しても解析モデルを作る必要がある。先端的な解析プログラムであればあるほど、入力となる解析モデルも精緻になり、個々のモデルの規模は大きくなる。

収集・蓄積が進む都市のデジタルデータを利用することで、各種解析モデルを自動構築する研究開発が進められている。例えば、カーナビの普及に伴って3次元の地図が利用できるようになっているが、3次元地図の元のデジタルデータを変換することで解析モデルを自動構築することは可能である。

各種デジタルデータを使う解析モデルの自動構築には、デジタルデータの不完全な可読性という大きな課題がある。典型例は、互換性が完全でないBIMのデータであろう。可読性が不完全なデジタルデータに対しては、対応する解析モデルのパラメータの値を複数、推定し、その数の解析モデルを構築する、という自動構築の方法が考えられている。

(3) 品質

ソフトウェア工学の観点では、防災の物理シミュレーションに一定の品質を保証することが要求される。品質は、計算された物理量の時間・空間分解能や精度である。品質保証の方法は、数値解析プログラムの検証と解析モデルの妥当性確認が標準である。物理シミュレーションの場合、検証は容易であるが、妥当性確認では、入力となる解析モデルに誤りがないことが必須である。解析モデルが自動構築される場合、自動構築プログラムの検証が妥当性確認と一致する。

物理シミュレーションの妥当性を確認するには、解

析結果と計測・観測結果の比較が一番、という考え方は根強い。しかし、この考え方は、上記のソフトウェア工学の考え方とは異なる。計測・観測のできればシミュレーションは無用である。「計測・観測のできない物理量を、物理方程式を解くことで科学的合理的に推定する」ことが物理シミュレーションの根幹にあり、検証と妥当性確認によってその推定に一定の品質を保証することが必要となる。

4. 都市丸ごとの統合災害シミュレーション

都市丸ごとの統合災害シミュレーションは、統合地震シミュレーション²⁾を契機とする。地殻内での地震波伝播過程、地表付近での地震動増幅過程、損傷に至る場合もある各種構造物の地震応答過程、群集避難・交通流・経済復旧過程を連携して数値解析するシミュレーションである。数値解析の統合とは、一つの数値解析の出力を次の数値解析の入力とする、数値解析を直列で繋げたことを意味する。スーパーコンピュータの利用を前提に、理学・工学の物理シミュレーションに加え、社会科学での先端的な解析プログラムの研究開発^{3),4)}が進められた。そして、数値解析の統合によって、首都直下地震と南海トラフ地震に対し、想定された地震シナリオに対応したい、首都圏と関西圏での災害・被害の過程が数値解析された。

地震を災害全般に拡張する都市丸ごとの統合災害シミュレーションは防災の新しい道具となることが期待されている。現在、3つのユースケースを設定し、実用に向けた研究開発が進められている^{5),6)}。以下、ユースケースと研究開発の概要を説明する。

(1) 被害確率評価

住民を対象に、土砂災害を含む風水害のハザードマップが提示されている。洪水の場合、台風や豪雨に様々なシナリオが想定され、複数のシナリオに対して、最悪となった浸水域を地図表示したものがハザードマップである。浸水の危険度を可視化し、洪水避難を促す点で有効とされている。その一方で、豪雨となれば常に浸水域が浸水する訳ではない。また、浸水域に避難所が設置されている場合があるが、住民がその安全性を理解することは難しい。

行政が避難所の設置に使うことをユースケースとして、都市丸ごとの洪水シミュレーションが開発されている。浸水の発生確率を明示することが重要で、浸水の可能性は0ではないが最も適切と判断できる場所を選定する意思決定を支援するものである。洪水避難促

進を目的としたものではないが、避難所の安全性を住民が理解できることも期待される。

避難所の設置選定が目的となるため、浸水の発生確率には高い品質が要求される。このため、数十年の間に発生が推定される台風・豪雨の多数のシナリオを想定し、河川系の増水過程、堤防の決壊過程、破堤箇所からの浸水過程という一連の過程を数値解析する物理シミュレーションを適用し、最高水準の精度を目標に確率推定を試みている。なお、国・県・自治体が管理する個々の河川に対し、各々、整合した浸水の発生確率を提示することが望まれる。このためには、河川系丸ごとの高度な物理シミュレーションが必要である。この難問が技術課題である。

(2) 動的被害評価

自然災害との戦いには長い歴史があるが、防災意識の維持は常に課題となっている。防災教育がこの課題解決には有効である。防災教育の一つの手段は災害の疑似体験であるが、都市丸ごとの災害シミュレーションを都市のマルチパスに投影することで、より現実に近い疑似体験を作ることが可能である。

住民のマルチパスでの災害疑似体験がユースケースとして考えられる。具体的には、大規模災害の発生から数日後に、発生したものと同一災害シナリオを、他の都市の統合災害シミュレーションに入力し、その結果を利用する。大規模災害発生後は防災意識が高く、「同じ災害が自分の町で発生したらどのような被害が生じ、どのように被害に対応するのか」をマルチパスで疑似体験してもらうことになる。防災教育に関わる行政が運用することが考えられている。

災害の疑似体験が目的であるため、シミュレーションには一定の品質が保証されれば十分である。品質の向上よりも、臨場感を上げるためのマルチパスの作り込みが重要である。また、防災意識が高い災害発生、数日後の疑似体験が必要である、物理シミュレーションの高速化は勿論、入力作業に必要な前処理と出力結果の整理等の後処理の高速化が技術課題である。

(3) 災害重畳

供用中の構造物が複数回の自然災害を受ける事態は全く想定されていなかった訳ではない。一度の災害で損傷をしても、相応の耐力は残るよう設計されている。しかし、気候変動の影響で風水害が激甚化傾向にある中、従来の想定よりも、風水害の発生頻度が高くなることは考慮しなければならない。さらに、発生頻度が高まったとはいえ、災害重畳の確率は低く、過度

の備えは避けなければならない。経験が乏しい災害重畳に適切に備えるためには、都市丸ごとの統合災害シミュレーションを使う重畳の想定は有効である。

地震と高潮の重畳を例にすると、最初の災害で被災した構造物の補修優先付けがユースケースとして考えられる。最初に地震が発生し、港湾構造物が損傷を受けた場合、損傷を加えた港湾部の解析モデルを使う高潮シミュレーションを実施し、港湾部の被災状況を数値解析する。この結果は、被災構造物の補修の優先付けに資する。最初に高潮、次に地震、という場合も同様である。利用者は港湾構造物の管理者等である。

被災構造物の補修優先付けが目的であるため、災害重畳シミュレーションの品質はこの目的にみあったものであれば十分である。むしろ、優先付けに間に合うよう、被災した構造物の入力といった前処理を迅速に済ませ、応急的な被害判定が終了後、数日程度でシミュレーションの結果が出力できることが重要と思われる。被害判定結果が自動的に解析モデルに取り込まれるようにすることが技術課題となる。

災害重畳とは異なるが、令和2年7月豪雨はコロナ禍の我が国を襲った自然災害である。疫病や有事といった非日常の状態にある社会の中でも災害は発生する。「非日常下での災害対応にどう備え、どう対応すべきか」は避けて通れない課題である。災害重畳と同様、非日常下での災害被害の把握には、都市丸ごとの統合災害シミュレーションは有効である。

5. おわりに

本稿は、自然災害が都市にもたらす被害を軽減するために、都市丸ごとの統合災害シミュレーションを概説した。防災研究の中で、このシミュレーションは横串の役割と総合防災への貢献が考えられている。中核

技術は、先端解析プログラムと解析モデル自動構築であり、発展が続く計算能力を活かすことが重要である。都市丸ごとの統合シミュレーションは研究段階であるが、具体的なユースケースを想定し、確率被害評価、動的被害評価、災害重畳の実用化が進められている。

災害と被害のシミュレーションは、各々の過程の様々な様相を数値解析するため、解析プログラムの統合が必須である。同時に、統合によって、見かけ上、一体化された巨大解析プログラムとして利用できるようになることも必須である。このため、多様な解析プログラムが統合的に利用できるとともに、都市のデジタルデータのアクセスと解析モデルの自動構築の機能をもった「プラットフォーム」の整備が必要とされる。

JCMA

【参考文献】

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP), <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>, 2025.
- 2) 地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築, ポスト「京」プロジェクト重点課題3, <https://aics.riken.jp/jp/post-k/pi/kadai3.html>, 2025.
- 3) M. Hori, T. Ichimura, L. Maddegeara, Integrated Earthquake Simulation, CRC Press, New York, 2022.
- 4) M. Hori (ed.), Application of High-Performance Computing to Earthquake-Related Problems, World Science, Singapore, 2024.
- 5) 防災デジタルツインの構築, SIP 第3期「スマート防災ネットワークの構築」, <https://www.nied-sip3.bosai.go.jp/research/detail-e.html>, 2025.
- 6) サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用, SIP 第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」, https://www.pwri.go.jp/jpn/research/sip/sub-assignment_d.html, 2025.

【筆者紹介】

堀 宗朗 (ほり むねお)
(国研) 海洋研究開発機構
部門長

