

災害対応技術における シミュレーションの役割と限界

奥村 誠¹・越村 俊一²・寺田 賢二郎²

¹正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所（〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1通研2号館）
E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉6-06-6）

東日本大震災の直後、企業や行政の責任者や技術者から、「想定を大きく超える津波であったため、対応を考えることができなかった」という言明がなされたことに對し、識者やマスコミから「想定外」を言い訳にすべきではない、という批判がなされた。しかし、我々が構造物などを設計しようとするれば、何らかの設計条件を想定しなければならないため、「すべての起こりうる状況を想定する」ことは不可能である。想定を超える条件を与えてシミュレーションを行うとしても、もともとシミュレーションが基礎とする方程式が適用できる範囲に限界がある。巨大災害などの「想定外」な事象に対するシミュレーションの限界と、それを乗り越える方向性についての考察を試みる。

Key Words : mega disaster, simulation, unexpected event, inter-disciplinary approach

1. 「想定外」に対する批判

東日本大震災の直後、企業や行政の責任者や技術者から、「想定を大きく超える津波であったため、対応を考えていなかった」という言明が多く聞かれた。これに對し、阪田土木学会長をはじめとする識者やマスコミから、「想定外」を言い訳にすべきではない、という批判や自己批判がなされた。

その代表的なものに、ノンフィクション作家の柳田邦男が文藝春秋に発表した論説がある。そこでは、「想定外というケースには、実は3つのケースがある。A：本当に想定できなかったケース、B：ある程度想定できたが、データが不確かだったり、確率が低いと見られたりしたために、除外されたケース。C：発生が予測されたが、その事態に対する対策に本気で取り組むと、設計が大がかりになり投資額が巨大になるので、そんなことは当面起こらないだろうと楽観論を掲げて、想定の上限を線引きしてしまったケースの3つがある。これまでのさまざまな災害事例を見ると、ケースAは極めて少ない。BかC、あるいはBとCの中間あたりのケースが、大半を占めているように見える」、と指摘している。そして、2005年4月のJR福知山線脱線事故に対する2年後の航空・鉄道事故調査委員会の報告書に書かれた次の一文を示し、日本と日本人の防災対策・安全対策における思考

のパラダイム転換を求めている。

「発生頻度が小さくても、一度発生すれば重大な人的被害を生ずるおそれのあるものについては、対策の推進を図るべきである」、と。

2. 「リスク」と「不確実性」

(1) F.Knightによる不確実性の定義

柳田の指摘は、情報経済学の分野におけるリスクと不確実性の定義と強く関連している。すなわち情報経済学の基礎を築いたとされるF.Knightは、「起こりうる事象が列挙でき発生確率が算定できる場合」を「リスク」、 「事象は列挙できるが確率が計算できない場合」を「不確実性」、 「事象も列挙できない場合」を「無知」と定義している。

そこで、東日本大震災の中で一般に「想定外」と言われていたものも、「確率がほぼゼロとみなせたリスク」なのか、「確率は計算できなかったが、起こるかもしれないとして認識されていた不確実な事象」なのか、あるいは「そのようなことが発生することを誰も想定できなかった、社会にとって無知（未知）の事象だったのか」に分類しておく必要がある。それは今回起こった問題に對して、誰に責任を問うべきか、そして今後どのように対応していくべきかが大きく異なってくるからである。

「無知」の部分には誰にも責任を問うことはできず、被害に対する救済を国などが事後的に行うしかない。原子力のように未知の部分が多い技術を安易に採用したことの道義的な問題はあるのかもしれないが、問題を予見する方法がないのだから法的な責任を問うことはできないと考えられる。しかし、このたび問題が実際に発生し、我々がそれを認識したことで、多くの事象が「無知」から「不確実」な事象に性格を変えたことになる。

(2) リスク事象のマネジメント

技術者や学会としては、今回の経験を踏まえて「リスク」の算定方法を改善し、より多くの「不確実性」の事項の確率評価を行い、合理的な「リスク管理」を可能にするために、知を生み出していくことが求められる。

Knight の定義するリスクは、確率が計算できる事象とその事象によって生じる被害の組み合わせなので、リスクを下げるための対応としては、A：発生確率を下げる、B：生じる被害を小さくする、という考え方がある。前者は、構造物などの強度を上げて外力による破壊の発生確率を下げるいわゆるハードな防災のほか、そもそも外力の大きい所に住まない、行かない、使わないことにより暴露を下げるという手段（リスク回避）がある。後者としては、個々の家屋の強度を上げる、避難することが考えられる。さらに被害の発生は仕方ないが、その拡大を防ぎ立ち直りを早くするために、予備の施設を持つ多重化、備蓄、緊急対応の体制を整えておくなどの「レジリエント化」の方法がある。このうちハードの防災は、どの程度の外力までを想定して備えるかという「想定」なしには計画できないことに注意が必要である。

社会的には「保険」を充実させ、より多くの主体でリスクを分担する「リスクファイナンス」も必要だが、保険事業は確率計算のできない事象には適用できないという限界がある。

3. 理系的発想とシミュレーションの限界

(1) 理系的アプローチの特質

一般的に、人類学や社会学、歴史学などの文科系の学問は、過去から存在してきた人間やその集団が、現実に発生した事態に対してどのように対応してきたかを扱う。そこでは地域における人間や人間の集団、社会の中で経験的に蓄積されてきた「経験知」を調査し、整理し、概念化するという役割を担っている。このような経験知は、先見的な正しさや論理性に基づいて設計されたものというよりは、その人間集団や社会が自然環境や社会環境との相互作用を繰り返す中で、試行錯誤的、帰納的に獲得されてきたものである。そのため、今後地球環境の条件が大きく変動したり、人口の年齢構成や産業構造などの

社会環境が変化すると、これまでの経験則が成り立たなく恐れがある。言い換えれば経験知には「内挿はできても、外挿ができない」という限界がある。

これに比べれば、理科系の学問が立脚している数学や物理学は法則性の成り立つ範囲が広く、異なる状況下に敷衍して当てはめることができる。つまり、これまでに経験したことがないような状況に対してもシミュレーション計算を行って外挿することが可能である。

とくに頻度が極めて低く、一生に一度経験するとは限らないような巨大災害について、実経験のない世代の人々に「経験知」を伝えることは困難であるが、科学的な「形式知」の形に翻訳することで、継承が少しは容易になる。

(2) 理系的アプローチの問題点

リスク管理では、事象の進展を司るメカニズムを理解して、確率を算定し、それをコントロールすることが重要視され、理系的アプローチに従って、因果関係を原因から結果に向かって、途中のさまざまな枝分かれを考えながらたどっていくことになる。そのため、確率が評価できない不確実な部分が途中にあると、それ以降の確率計算ができなくなる。その結果、検討がなされない部分が残ったり、リスクの評価を先延ばしし、実際には何の対応も取られずに放置される危険性がある。

土木施設の計画の透明性、客観性を高める手段として、「費用便益分析」の実施が義務付けられてきている。この費用便益分析の基礎となるミクロ経済学は、理系的なアプローチで社会における個人や組織の行動を分析しようとする学問である。そのため、リスクや不確実性がある状況下に当てはめようとするれば、確率がゼロに近い現象は無視され、不確実な現象への対応が先延ばしにされるという傾向をはらむ。とくに、今回の震災のように発生確率が低く、現象の観測が十分蓄積されていないために法則性が明らかになっていないような巨大災害では、事象の発生確率を精度良く算定することには無理があるため、柳田のいうBのケース、すなわち、「データが不確かだったり、確率が低いと見られたりしたために、想定から除外される」結果になる危険性が高い。

(3) 理系的シミュレーションの限界

実際に数式を用いて計算機上でシミュレーションを行おうとすると、空間や時間の範囲、計算間隔を具体的に定めなければならない。その過程で、想定した範囲の中での結果のみに関心が向かい、原理的には起こる可能性のある多数の状況を見逃してしまうことになる。たとえば、ビリヤード台の上の玉の動きを精密にシミュレートするプログラムを作る時、玉が途中でいくつか割れたり、ビリヤード台の外に飛び出る可能性を見逃したプロ

グラムを作る限り、「想定しなかった事象は計算できない」という問題が発生する。

現象をモデル化する際、一定の幅を持つ空間や時間を考え、そこにおける平均的な状態量に着目して、隣接する領域を持つ状態量を参照しながら、当該領域の状態量の時間的变化を追いかけるのがマクロ・シミュレーションという手法で、多くのシミュレーションの基礎的な考え方になっている。この時、状態量の変化を表す方程式に含まれるパラメータは、過去に観測された運動に当てはめて同定されるので、過去の観測の範囲外の事象が発生しにくいようにパラメータがチューニングされてしまう。

一方、マルチ・エージェント・シミュレーションでは、領域ごとの平均値ではなく、たとえば粒子、人や組織などの個々の活動要素をエージェントとし、それぞれが自分の状態量と近傍のエージェントからの作用にしたがって状態を変えたと考える。高速で移動してきた他の玉から衝突により強い力を受けた結果、玉が割れたり、ビリヤード台の外に出るほどの速度になるという可能性を考えることができる。また、多くのエージェントが非線形的な相互作用を行うシステムを研究する「複雑系」研究では、そのような相互作用の中から、特徴のあるマクロな動きが「創発」する可能性があると認めている。これにより、計算により扱える現象の幅を拡げ、事前の想定枠を拡大できる可能性がある。

しかし、発生確率の低い「創発」現象をシミュレートするには、やはり莫大な回数の計算が必要であり、マルチ・エージェント・シミュレーションであっても、計算や分析のためのコストが大きくなることは避けられない。

3. 真の不確実性への対応方策

(1) 文系的アプローチの可能性

現実起こった事象を観察してその前後の事態の進展を理解するには、人文系、あるいは社会系のアプローチが有効である。原因が分からなくても、また確率が計算できなくとも、我々は断片的な事象から対応を考えることができる。例えば、津波により最終的に溺死する事例が観測されたとする。津波の水がいつ、どこから、どのような速さでそこに来たのかという現象のメカニズムを理系的アプローチで解明できなくても、この事例に基づいて、各自がライフジャケットを備えるという対応を考えることは可能である。

今回の震災のような巨大災害では、メカニズムが不明で、最初の事象から因果の連鎖を順方向にたどりながら確率を評価する理系的なアプローチには限界がある。

「事態の全貌を把握して適切な対応を取ることが望ましい」という正論にとらわれず、「知識は断片的にし、

起きたことを直視し、できることから対応を取る」ことも必要であり、そのためには「不確実性」をそのまま飲み込む文系のアプローチが役立つと考えられる。

ただし、このようなアドホックな対応策の多くは、平常時には必要ない資源や人材を余分に抱えておくことになるため、個人や企業に任せても面倒さや経済的合理性の点で実行されない危険性が大きい。社会の中での必要性の合意と啓発が不可欠であるし、制度化を考える必要もある。

一方で、確率を計算できる部分を増やすことにより、民間の合理的な経済判断の中で採用されるものをできるだけ増やしていくことができるので、理科系の立場からリスクの定量的な評価方法を同時並行的に研究していくことが重要である。

(2) ソフトな施策のデザイン

不確実性への対処を考えるには想像力が必要であり、文系のアプローチも駆使しながら過去の災害や失敗に学ぶことが有効であろう。計画の場面では、費用便益分析という定型的な手続きからこぼれおちる不確実性への対処をどうデザインするかが重要なテーマになる。

例えば、都市を十分な隔離のある区画にして大火災への対応をより小さな規模で確実にできるようにするとか、非常時に使うスペースを日常的には公園として使うことによって、個々の事象発生時の便益では正当化できないが、多くのケースで便益を生じる空間や施設をデザインすることが有効となる。あるいは水泳大会や祭りの行事を通して、住民の危機対応能力の育成に努めるといったソフトな政策も必要かもしれない。

この時に悩ましいのは、行政に対する一般市民の過度な期待である。一般に市民は、「行政は間違うべきではないし、結果としての間違いについて、その責任を行政が全て負うべきである」と考えている。しかし、不確実性への対応は想定通りに行かないのが当たり前で、行政がやろうが、誰がやろうが、難しいことには変わりがない。想定通りにならないことを皆が許さなければ、不確実性に立ち向かうことはできないのである。

(3) 津波対応におけるレベル2の意味

今回の震災後の津波防護方針における「レベル1、レベル2」という考え方は、「リスクを2段階に分けてそれぞれの段階で確率評価に基づくリスクマネジメントを行うことにした」というよりも、「レベル1までをメカニズムが想定できる『リスク』と考えて行政が全面的に責任を持つ一方で、レベル2外力下での状況は『不確実性』の事象として仕分けた」ということではないだろうか？

この時、レベル2に当たる不確実な事象の捉え方や判断には一つの「正解」はない。もし、住民がこの不確実

性への責任を政府や行政に負わせようとすれば、政府や行政も確率的な判断ができないため、最悪を想定するか、とりあえずの一律基準を持ってくる、という対応にならざるを得ず、地域の自由度が失われてしまう。地域ごとに不確実性への対応方法に自由度を持ちたいのであれば、地域ごとに経験に学び、想像力を働かせ、共通認識をつくり、その地域での政策への合意を取り付けていくしかないと思う。

4. 不確実性対応力向上の方向性

(1) 想定を広げる

不確実性に対する対応力を高めるための第一は、少なくとも過去に発生し、今後も発生する可能性のある事象についての知識を蓄えて、「無知」の状況下での不意打ちを避けることであろう。その意味で、歴史や経験に学ぶことが重要であり、まれにしか起こらない災害・事故などの記録蓄積を行うことが重要である。このとき、現在の技術や理論では解析が困難であり、十分に理解できない記録や情報も、将来的には解析されて有用な情報が引き出せるようになる可能性があるから、可能な限り多面的な情報を意図的な編集などをあまり加えずに残していくことも重要である。

また、我々が計画や対策を立案する過程では、様々な状況の想定が実施されている。結果的に計画や意思決定の結果には反映されていないものの、このような想定の中に将来発生する可能性がある事象が含まれていると期待できる。したがって計画や意思決定を行う際には、その最終結果だけでなく、途中で想定した事象や採用されなかった対策案も、見える形で残すことが望ましい。

これらの記録を残す一方で、過去からの記録を複数の人数で閲覧し、その内容を足がかりに将来起こりうる事象についての議論を行うことが極めて重要である。

(2) シミュレーション技法の改善

過去の災害などの経験から学ぶべきものは多いものの、その時に有用であった対策が、季節、時刻や気象などの条件が異なる形で来襲する次の災害においても有効であるかどうかは分からない。そこで、異なる条件下での災害の様相をシミュレーションで作りだし、その中で考えられる施策の有効性を確認し、課題を抽出することが求められる。

シミュレーションモデルは、その策定に置いて過去の発生事象に合わせてチューニングされるため、本当に経験したことのない様な状況下での計算結果の現実性には問題が残らざるを得ない。その際、過去の事例と箱となるさまざまな条件で計算が可能のように、より一般性のある理論式に立脚したモデルを開発するという方向性

が求められる。

一方、使用段階においても、モデルの作成者があらかじめ想定した計算条件の範囲で適用するだけでなく、異なる立場の人間が異なる条件を設定できるような柔軟な仕組みがあることが望ましい。例えば、因果連鎖を最初からたどるのではなく、破壊現象の途中の状態を外部から入力し、そのから後の進展をシミュレートできるようなオープンな運用ができることが望ましい。

(3) 対応を考える時間的余裕を作る

モニタリング技術（センサー、異常検知）を使い、異常を早い時点で検知し、緊急対応の必要性の覚悟を早くする。さらに、その後の事態の進展を監視し、どの程度の時間が残されているのかを冷静に把握できるようにする。

複雑な判断を急いで行おうとせず、問題を分割して単純化し、一つずつ段階的に対応をする。まず重要な人命の確保だけを図り、時間を稼ぐことを考える。

資材、人員、資金、空間の調整に手間と時間を取られることを避けるため、できる限り災害対応用の余裕を確保しておく。災害発生時の通常の業務をどの程度中断して緊急業務に振り向けるのかを事前に検討し、周知しておくことが必要である。また、事前に外部組織との事前協定を持つておくことも有効である。

(4) 各自が迷わずに行動できるための単純化

住民などに対応を求める場合には、対応の種類を少なくし、迷わせないような配慮が必要である。例えばどのような種類の災害でも、またどのような規模の災害でも、同じ場所に逃げるができるように、避難場所の条件を確認しておく必要がある。

その意味では、求められる条件が異なる緊急避難場所、避難所、仮の住居、恒久住宅などの違いが明らかになるような名称の検討も必要であると考ええる。

(5) 事前対応を可能にするための共通化

確率が小さい不確実な事象に個別に対応しようとしても、費用が正当化できない。多くの事態への対応を共通化し、まとめることで対応の可能性を高める。因果連鎖を順方向にたどって検討するだけではなく、イベントツリーを、右側でまとめていくという考え方が有効である。例えば、どのような災害であっても最終的に消防署や病院への道路が必要となる。

不確実性への備えに別の意味をつけて継続させる。例えば避難や救助の行動に、祭りやスポーツなどの別の意味を持たせて社会の中で継続するように考える。災害対応の文化化とも呼ぶことができる。

施設整備においては、多目的化、汎用化が有効であ

る。災害対応用の空地や施設を別の用途でも使うことにより、その整備を可能にする工夫が必要である。

(6) 防災の主流化

不確実な災害事象を主目的にして施設整備や対応の充実を図ることが困難であることから、むしろ他の目的での計画を行う際に災害時の機能を考慮し、施設や仕組みを災害対応のために転用できる可能性を高めることも有効であろう。

これと関連して、20世紀末の巨大災害の頻発を受けて世界的に提唱されるようになった「防災の主流化 (Mainstreaming Disaster Reduction)」という流れがある。つまり、どのような公共計画を実施する際にも、経済性や環境性能などと並んで防災性を主要な視点として持ち、その実施が漸進的に防災性の向上につながるようするという考え方である。

5. おわりに

真の不確実性に関しては、これまでの計画論が前提としていた「事態の全貌を把握して適切な対応を取ることが望ましい」という考え方が成立せず、どのようなアプローチが有効であるかもよくわかっていない状況にある。しかし、不確実性に気付いて知識を総動員して対応策を練る、そして実際に不確実な事象が顕在化した時にも、それなりに賢く対処するのは人間のみに許された行為であり、Shumpeterはそれこそが企業家の能力であり、報酬の源泉であると述べた。社会の情勢や知識、そして技術は時間とともに大きく変わる。例えば今回の震災時に大きな役割を果たしたツイ

ッターは10年前には存在しなかった。したがって今我々が考える不確実性への対処法も、すぐに陳腐化して考えなおしを必要とするだろう。その意味で、いま最善策をよく考えて間違いなく次項できるように準備するというより、常に改善を考え続けるマネジメントの姿勢が必要である。現在の基準、法律、技術、能力にとらわれ理必要はなく、創造力と想像力を持って取り組むべき課題である。

最終的には将来の世代に判断を預けることになるだろうが、彼らがより賢い選択をするために、我々の世代がより多くのことを考え、試行錯誤し、その記録を残すことが我々の使命であると考えます。

参考文献

- 1) 柳田邦男 (2011) : 「想定外」か? —問われる日本人の想像力、文芸春秋、第89巻第5号 (2011年5月特別号) pp.126-133.
- 2) Knight, Frank H. (1921) : Risk, Uncertainty and Profit, Houghton Mifflin Co. フランク・ナイト著、奥隅栄喜監訳(1969) : 危険、不確実性及び利潤、文雅堂銀行研究社.
- 3) 酒井泰弘 (2012) : フランク・ナイトの経済思想—リスクと不確実性の概念を中心として—、CRR-Discussion Paper No. J-19、滋賀大学経済学部附属リスク研究センター、<http://www.econ.shiga-u.ac.jp/10/2/3/res/9/> DPJ19Sakai201205.pdf
- 4) 園田敏宏 (2012) : トピックス—防災の主流化について—、JICE Report Vol.22, pp.64-66.
- 5) 白鳥正樹編著 (2013) 工学シミュレーションの品質保証とV&V、丸善.

(2013. 5. 7 受付)

ROLE AND LIMITATION OF SIMULATION IN –DISASTER RESPONSE

Makoto OKUMURA, Shunichi KOSHIMURA and Kenjiro TERADA