

2.2 総合防災

2.2.1 地震・津波防災

(1) 社会的貢献 ―科学的知見に基づく災害予測のシステム化を目指して―

南海トラフの巨大地震や首都直下地震等、大地震の備えを不断に行うことはわが国に課せられた宿命である。合理的に備えるためには精度の高い被害想定が必要であるが、現状では国レベルでの被害想定には経験式が用いられているため、その精度には多くの疑問がある。より合理的科学的な地震災害の想定・予測が必要とされており、大規模数値計算を使った地震・津波とそれにともなう災害のシミュレーションはこのための切り札となり得る。

被害想定においては、2011 年東日本大震災が突き付けた「想定外」の轍を踏まないためにも、人間の先入観を排除し、観測されるデータと物理モデルから予測される多様なシナリオに対して、その結果、どのような被害が生じ得るかを考慮することが不可欠である。地震のシナリオを考えるにあたっては、地震の発生過程を左右する震源域の上限・下限・水平方向の広がり・破壊開始点・仮定する摩擦則をそれぞれ 4～5 通り考慮するだけでも、その組み合わせは 1,000 を超える。こうしたシナリオは、観測事実との整合性等を考慮して数十程度に絞り込むことになる。そうしたとしても、揺れを評価する個々の建物直下の地盤情報や建物の劣化状況、津波遡上に影響する港湾や河川毎の詳細地形の曖昧さを考慮したり、広域に被害をもたらす巨大地震で同時に複数の都市を計算しようとする、結局 1,000 ケース程度の地盤震動や津波遡上を計算することになる。そのような多数の地震シナリオを想定し、地下や海底の情報の不確実性も考慮した上で、将来起こり得る被害の多様性を見据えて防災・減災対策を進めなければならない。これは現在のたかだか数例の地震シナリオの想定に基づく防災・減災対策とは一線を画す。また、信頼度の高い被害想定のためには、合理的な法則に基づく構造物と都市のシミュレーションが不可欠である。具体的には、震源からの弾性波動伝播、地盤と構造物の震動、津波の伝播と遡上などのシミュレーションである。更に、揺れや遡上を受けて、どのような経路で避難するのがよいか、また避難誘導を効果的に行うには誘導する人がどこにどれだけ必要かといったことのための避難シミュレーションも必要となる。

また、地震発生から津波遡上に至る一連のシミュレーションは、地震発生前の減災対策に資する災害予測としてだけでなく、地震直後の初動対応のための災害予測としても重要である。地震直後は、特に広域災害で、かつ夜間などの場合、被害状況を推定することは困難を極める。そのような状況において、数時間以内に、発生した地震や津波のデータと、一連のシミュレーションを基に災害予測を行うことができれば、被害状況の推定にとって有益な情報が得られると期待される。

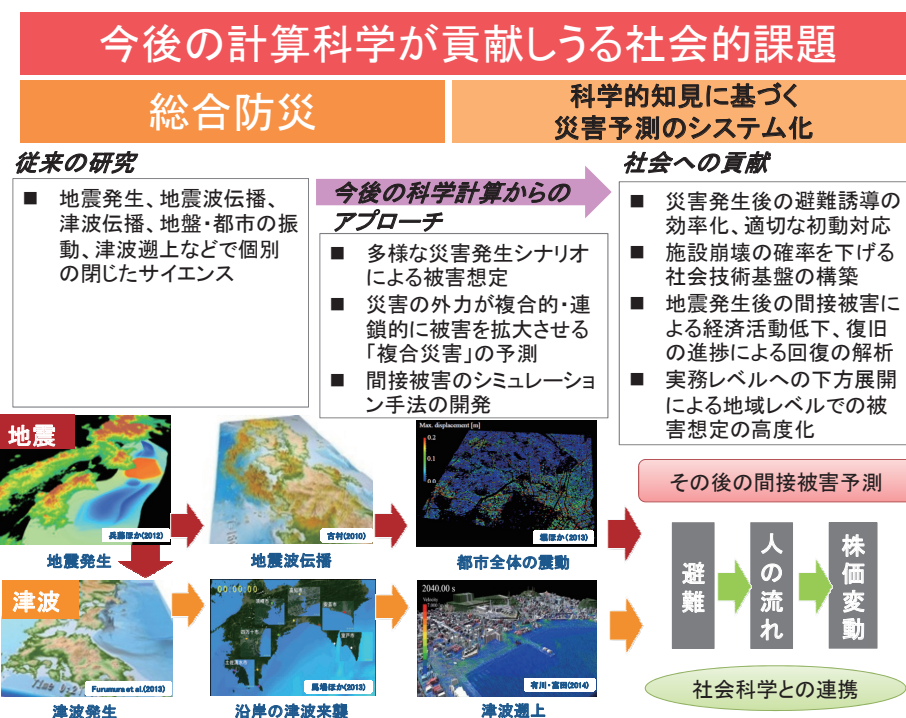
一方、東日本大震災での津波による被災過程から明らかになったように、巨大津波が港湾施設と市街地の隣接した地域を襲う際の被害の波及は、単なる海水の侵入による施設破壊に留まらない。例を挙げると、宮城県気仙沼市では津波の来襲にともなうタンクや船の漂流にともなう油の流出と引火により大規模延焼火災が発生し、被害は甚大なものとなった。このように、災害の外力が複合的・連鎖的に被害を拡大させる過程を「複合災害」と呼ぶが、その発生メカ

ニズムや被害の波及過程を予測できる技術はいまだ発展途上である。複合災害の被害想定には、地震波の伝播や津波の遡上といった連続体の計算だけでなく、長時間の震動による液状化、津波による構造物破壊、漂流物の移動やその衝突による構造物破壊、更には火災といった現象を扱う必要があり、さまざまな物理法則に支配される現象を予測する高精度なシミュレーションモデルを高度に連成させたマルチフィジックスシミュレーションを行う必要がある。

こうしたシミュレーションを行うことができれば、例えば防潮堤・防波堤等の海岸施設において、以下のようなことが期待される。まず、施設が破壊・倒壊するまでの時間を少しでも長くする、すなわち施設が完全に流失する「全壊」に至る可能性を少しでも減らすような、減災効果を目指した構造上の工夫への要件を明らかにすることができる。また、津波に対する構造物の安定性を評価する技術基盤を構築したり、沿岸部の津波被害（複合被害）拡大リスクを減少させるための評価技術を確立したりすることができる。

一方で、グローバリゼーションが進む経済活動の発展を考えると、将来の地震災害は、構造物や都市の被害という直接的な被害に加えて、この被害がもたらす都市や地域の経済活動の低下といった間接的な被害をより深刻なものとするのが指摘されている。したがって、直接被害の推定の信頼度を持続的に向上するシミュレーションの高度化とともに、地震発生直後の経済活動の低下と被害の復旧の進捗による経済活動の回復を解析できる、間接被害のシミュレーション手法の開発も重要な課題と言える。例えば、電力流通復旧過程において、どれだけの人数の作業員と指示員が、どこからどういう順番に復旧をしていくのがよいかといったことを分析するためには、複数のエージェントの相互作用による振る舞いを分析することができ、避難シミュレーションでも使われているマルチエージェントシミュレーションが応用できる（この場合は作業員がエージェント）。これを、都市や地域の経済の回復と関連させることが、間接被害のシミュレーション手法開発の第一歩となるだろう。

以上のような地震発生シナリオから被害想定に至る一連のシミュレーションは、日本にとって重要なものである。その一方で、極端に言えば自然の中の複雑な人間活動すべてを計算機で追跡する極めて複雑なものであるため、その時代の最先端の HPC 上で、継続的に解析手法・モデルを高度化しつつ開発を行うことが必要である。それと同時に、5 年、10 年単位での HPC の高速化に応じて、一時代前に最先端 HPC 上で開発したシミュレーションツールを、個別の地域を対象とする研究機関や大学での研究レベルや実務レベルに順次下方展開していくことも重要である。これにより、国レベルでの大規模災害に対する想定業務はもとより、各地方自治体や企業レベルでの想定業務が、継続的に高度化され、信頼性を高めていく流れができる。そのためには、継続的に最先端の HPC、それに続く研究レベルや実務レベルの HPC を開発・製造することが必要になる。これは、最新の計算科学に基づいた最良の被害評価手法を標準化したものとして社会で共有し、減災に結びつけることであり、この課題の社会的意義でもある。



(2) サイエンスの質的变化

地震・津波分野では、従来は、地震発生・地震波伝播・津波伝播・地盤や都市の振動・津波遡上といった各現象を独立して扱い、それぞれが閉じたサイエンスとして発達してきた。例えば、地震発生であれば、地震発生に関わる仮説を提案し、それに基づいて断層運動の結果としての地殻変動や地震波形をシミュレーションで計算し、観測データとの比較によって仮説を検証することが行われてきた。しかし、東日本大震災をもたらした M9 クラスの地震は、その繰り返し間隔が数百年以上に及ぶため、地殻変動や地震波形の観測データは、最近発生した地震に対してしか得られない（そこでは同様の地震は当面起こらない）。これに対して、地震発生から都市の振動や津波遡上までをつなぐシミュレーションが実現すれば、これまでとは質的に全く異なる状況となる。各現象には、それに応じた観測データがさまざまな時期にさまざまな精度で残されている。例えば、津波堆積物は 1000 年以上にも遡ってデータが存在する。そのため、ある一つの地震発生シナリオに基づいて津波遡上まで計算すれば、それが数百年前に津波堆積物をもたらした現象と整合するかどうかを、誤差を考慮したうえで科学的根拠に基づいて評価することが可能となる。それを非常に多数のシナリオに対して行えば、それらのシナリオがさまざまな時空間スケール、そしてさまざまな精度で散在している貴重な観測データに対して、どの程度整合しているかを評価できることになる。同様なことを、津波堆積物だけでなく、地震発生から建物の振動や津波遡上に至る過程に対して適用していくことで、質の異なる多様なデータ（情報量の多さとしてビッグデータでもある）を統合的な知見として集約していくことができ、これまで個々に発展してきたサイエンスが、分野の垣根を越えて総体として発展していく道筋ができると期待される。

また、分野の垣根を越えるという意味では、津波に関わる課題において、これまでの各分野で独立に先鋭化された地震学、計算工学、流体力学、構造工学といった学術分野を専門とする研究者が連携して問題に取り組むようになりつつある。具体的には、(1) 沖合の津波観測情報のリアルタイム処理と波源の推定、(2) リアルタイム浸水予測を含む津波ハザード解析手法の高度化、(3) 津波氾濫にともなう土砂移動・地形変化の解析手法の高度化、(4) 固体・液体の連成解析手法の確立、(5) 避難行動解析を含む人的被害予測手法の高度化などが課題として挙げられる。なかでも、津波に強い町づくりに資する重要なテーマとして、「固体・液体の連成解析手法」の取り組みを更に発展させ、津波による複合災害の予測と減災対策への利用・普及を目的としたマルチフィジックスシミュレーションモデルを開発するといった目標を達成するため、以下に示すようなテーマに取り組むことで、今後より一層の連携が進むはずである。

- ① 巨大地震津波の近地・遠地の波動場の高精度予測（全球シミュレーション）
- ② 構造物の破壊・被害拡大過程のシミュレーション（水位・流速・波力・破壊・漂流物・火災等）
- ③ 流体・構造物・地盤の相互作用の解明
- ④ 「粘り強い構造」の性能と設計照査のための予測技術体系
- ⑤ 津波防災地域づくりへの貢献

更に、マルチエージェントシミュレーションを活用した間接被害のシミュレーション手法の開発は、計算科学と数理経済学を結ぶ新たな境界領域となることが期待され、これは、計算科学の社会科学的課題への貢献にもつながるものである。

(3) コミュニティからの意見

一般論として、災害対策の実務において、シミュレーション技術の発展が社会の問題の具体的な解決にどのように役立つのかといった意見がある。具体的には、予測結果はどの程度正確なのか、結果のばらつき・不確実性はどのように考えるのか、逆に、災害対応の現場において果たしてそこまで高度な予測結果が必要なのか、といったことである。例えば、シミュレーション結果を津波に強い町づくりに向けてどの局面で活用していくか、といった課題がある。これらは、研究成果の社会実装を考えるうえで取り組むべき重要な課題であり、これらの疑問への回答を得ることを念頭において、シミュレーション結果の検証やばらつき・不確実性へ考え方も含めて課題に取り組む必要がある。なお、ばらつきや不確実性は、現象の本質やデータが不可避免的に不十分であることに起因する面が大きいので、HPC を活用した多数シナリオの導入によってそれらを定量化したうえで、実務に関わる人達と一緒に、実務への生かし方を検討することが不可欠である。そのなかで、災害対応の現場でどのように高度な予測結果が生かせるかを示して行く必要がある。

また、平成 25 年 5 月 20 日に行われた日本地球惑星科学連合同大会の特別セッション「ハイパフォーマンスコンピューティングが拓く固体地球科学の未来」においては、工学分野からの意見として、災害予測や被害想定をシミュレーションベースで行う方向性について全面的に賛成する一方で、本当のニーズをいかに捉えて、それに応えるものにしていくかの重要性が指摘された。ニーズに応えるといっても、受け手からの一方的な要求に応えるのではなく、災害予測や被害想定の実力に見合った範囲で、かつ受け手が満足できるところのコンセンサスを得

ることが重要である。そのためには「ご意見伺い」ではなく、ユーザを取り込み、分野を超えた共同研究を行うことが必要になる。また、これからの方向性として、オンデマンドで、個人や個々の団体のニーズに合わせた減災に資する情報を、Web やスマートフォン等も活用して個別に発信していくことが複数の講演者から提案された。更に、地球科学は、真理を探究する認識科学から、観測データとシミュレーションを両輪として問題解決のための予測能力を高める設計科学への質的転換が必要であるとの指摘もなされた。

このように、コミュニティ内外からの意見は、基本的に本書における計画の方向性を支持しつつ、よりよいものにするための意見であったと言える。

(4) 計算機要求

防災連携シミュレーション(地震直後の被害状況予測)について、地震発生から建物の振動、津波遡上に至るまでのシミュレーションで個々のアプリケーションに必要となるのは、1 ケース当たりで最大メモリ量~0.1PB、最大演算量~25.8EFLOP であり、地震発生、波動伝搬、地震動増幅(広領域および都市部)、建物震動、津波遡上を合わせた 1 ケース分の演算量の総計は約 75.7EFLOP となる。

課題	要求性能 (PFLOP/s)	要求メモリ リバンド幅 (PB/s)	メモリ量/ ケース (PB)	ストレージ 量/ ケース (PB)	計算時間/ ケース (hour)	ケース 数	総演算 量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
防災連携シミュレーション(地震直後の被害状況予測) 内訳は以下(1)~(6)	7	15	0.1	9.00	3		310000			地震発生は1領域1000シナリオを5領域行う。各領域について1000シナリオ中、観測に基づき20シナリオを選び、波動伝播計算を行う。一方、地震動増幅や建物震動・津波遡上については、地盤構造や建物劣化、海底地形の不確実さを考慮するために数十ケース計算するとともに、複数の都道府県の都市(例えば南海トラフ地震の場合に、東海・近畿・四国・九州の4都市)を一度に計算する必要を考慮すると、結果的に各領域で1000ケース程度は計算が必要。アプリの最大BF値=8.0
(1) 地震発生			0.00086	0.00086		5000	48	境界積分法による地震サイクル計算	要素数 10^7	アプリの最大BF値=4
(2) 波動伝搬			0.1	0.5		100	1400	差分法による弾性波動伝搬計算	$1200 \times 1000 \times 200 \text{Km}^3$ ($125 \text{m} \times 125 \text{m} \times 62.5 \text{m}$ 格子)、 ステップ数24万回	アプリの最大BF値=2.14、京での実測1.4。1ケースあたり演算量14EFLOP(東北大調べ)。東大前田先生による新バージョンを京でも主に利用。そちらは20EFLOP。
(3) 地震動増幅			0.01	4		5000	130000	有限要素法による地震波動計算	30億節点($300 \times 250 \times 10 \text{km}^3$)	アプリの最大BF値=8.00
(4) 地震動増幅			0.01	4		5000	130000	有限要素法による地震波動計算	30億節点($30 \times 25 \times 1 \text{km}^3$)	アプリの最大BF値=8.00
(5) 建物震動			0.05	0.05		5000	500		構造物100万棟	BF値=0.26(実測値)。メモリ転送量はBF値と演算量から逆算。BF値はキャッシュに載るので小さい演算量はプロファイルからの外挿と一致、メモリ転送量はプロファイルからの外挿
(6) 津波遡上			0.002	0.5		5000	50000	Navier-Stokes方程式複数モデル(静水圧近似、非静水圧、VOF法)計算	$3 \times 3 \times 0.08 \text{Km}$ (1都市領域を1m格子幅)から $1400 \times 1100 \times 10 \text{Km}$ (5.4Km格子幅)の複合格子、7都市同時計算、72万ステップ	演算量、メモリ転送量、メモリ量は実測値からの外挿。BF値=10(実測値)
避難誘導シミュレーション	3.3	0.28	0.3	0.006	1	5000	60000	マルチエージェントモデルによる行動シミュレーション	300,000 agents, 18,000 steps (1 hour simulation), 1,000 Monte-Carlo members	演算量は命令数である。浮動小数演算は命令数のおよそ1/40。演算量、メモリアクセス量、メモリ使用量は京でのプロファイルから外挿

(注：地震発生から津波遡上は防災連携シミュレーションの内訳である)

さまざまな地震発生のシナリオを、地盤構造や建物の震動特性、海底地形などの不確実性を考慮して多数のケースについて計算する際には、計算時間の制約はそれほど厳しくない。しかし、迅速な対応が求められる地震発生直後の災害予測に対しては、時間的な制約が大きくなる。地震発生直後の被害状況を予測することを想定した場合、数時間以内には計算が終了することが必要となる。この場合、不確実性の考慮はしないとしても、複数都市の同時計算は必要となる。例えば南海トラフ巨大地震で、東海・近畿・四国・九州の4都市で地震動増幅・建物震動・津波遡上を計算する場合、総演算量は約250EFLOPとなり、これを3時間以内に終了させるとした場合の実効的な要求性能は20PFLOPS以上となる。この値は一見小さく見えるが、ここで用いるほとんどのアプリケーションがメモリバンド幅に律速であることや、演算量の多くを占めるアプリの京（BF値=0.5程度）での実行効率が10-20%であることを考慮すると、最低でも100PFLOPS程度のピーク性能は必要である。実際は、「京」よりもノード数が大きくなるなど計算効率は下がると考えられ、数100PFLOPSから1EFLOPSのピーク性能を持つ計算機でないと要求が満たされないであろう。ただし、地盤や建物の震動、津波遡上は、より多数の都市での計算が本当は必要であることに注意する必要がある。そうした個々の都市での計算のためには、フラグシップマシンではなく、リーディングマシン第2階層のような別のマシンで対応するのが現実的である。その場合も、迅速な対応のためには、少なくとも100PFLOPS程度のピーク性能が必要である。

なお、地震発生前にさまざまな不確実性を考慮した予測を行う場合でも、(1)で触れた通りケース数が一つの領域で1,000程度必要となり、日本列島を囲む海域を5領域（千島海溝、日本海溝、相模トラフ、南海トラフ、琉球海溝）に分けたとすると5,000ケースの計算が必要となる。この場合の総演算量は31万EFLOPとなり、約5ヶ月の占有で日本列島全域のプレート境界地震を対象とした地震発生から津波遡上までを含めたシナリオ計算がようやく実現できる。

一方、群集避難のためのマルチエージェントシミュレーションでは、避難制御への展開を目標としている。この場合、リアルタイム以上の速度で30万程度の群衆が避難する過程を解析できる高速なマルチエージェントシミュレーションが必須となる。また、統計的に意味のある結果を得るためには、モンテカルロ法により1ケースあたり1,000回程度の試行が必要である。このようなシミュレーションに必要とされる計算は、エージェント一つ当たりの計算が現在と同程度の場合（1ステップの演算回数は1エージェント1モンテカルロシミュレーション当たり2百万回程度）、1時間の避難のシミュレーションに対して演算回数は12Exa回程度必要となる。必要となるメモリ（1エージェント当たり1MB程度、エージェントがラスタデータの地図データを持つとメモリはそれに応じて増加する）は0.3PB程度である。現状のマルチエージェントシミュレーションでは、プログラム中で多用しているC++のテンプレート等の京での整備が遅れているため計算効率が低い（理論性能の0.2%程度）。仮に理論性能が1EIPSのマシンで同じ効率（0.2%）であるとする、実効性能が2PIPSなので、6000秒（実時間の約1.7倍）で計算を終了することが可能である。ただし、周囲のエージェントのわずかな数秒先（10～100ステップ先）の動きを予測するアルゴリズムを加えるだけで、1エージェント当たりの演算回数は最大2桁程度大きくなる。現在開発中の先読みアルゴリズムを次世代計算機でどの程度を想定するかという見通しはまだないが、より現実的なエージェントシミュレーションには、実効性能を上げるとともに、より高い演算性能の計算機が必要なことは確かである。