

科学技術イノベーション政策のための科学 研究開発プログラム
「市民生活・社会活動の安全確保政策のための
レジリエンス分析」

研究開発成果報告書（特別枠）

（研究開発期間 平成 25 年 10 月～平成 28 年 9 月）

研究代表者： 古田 一雄（東京大学）

1. 設定した課題と目標

本研究プロジェクトでは、市民生活・社会活動に不可欠な重要インフラに自然災害、人為的脅威、事故といった脅威が加わったときの複雑な挙動について、如何なる部分が脆弱なのか、如何なるリスクが生じる可能性があるかを様々なシナリオの下でシミュレーション分析し、相互依存性の考慮や多角的視点からの包括的レジリエンス評価の必要性に関する科学的根拠を明かにする。

こうして得られた根拠情報に基づいて、わが国の市民生活・社会活動に係る危機管理政策やリスク・ガバナンス戦略への選択肢を提案し、この社会的課題の解決に寄与することを目標とする。

以上の目標を達成するために、以下の課題について研究開発を実施した。

- 最新のモデリング及びシミュレーション技術を活用し、電力、ガス、水道、物流、通信など複数の重要インフラ相互の依存性を考慮に入れながら、脆弱性・耐性、リスクの評価および評価結果の見える化を行う。
- 多角的な視点と多様なステークホルダーの利害を考慮しながら、重要インフラのレジリエンスを定量評価するための枠組みと評価手法を開発する。また、復旧プランの策定や合理的政策議論を支援するための手法を開発する。
- 我が国の緊急処理事態に係る法制度や政府などの危機管理機能の現状分析、海外との比較検討、さらに上記技術的研究により得られた知見を踏まえ、政府のレジリエンス向上策の立案、非常時対応のための組織制度設計に資するための提言を行う。

2. プロジェクトの成果

- 複合インフラシステムのモデリングとシミュレーション
 - 関東圏を対象とする災害リスクを考慮したエネルギー需給分析
 - 東京都区部を対象とする災害時の交通・物流シミュレーション
 - 東京都区部を対象とする上水道システムのレジリエンス分析
 - 東京都区部を対象とする固定電話ネットワークのレジリエンス分析
- レジリエンスの総合評価と意思決定支援
 - 東京都区部を対象とした複合インフラの相互依存性解析
 - 災害コンテキストモデル
 - リアクティブな意思決定による復旧計画
 - 危機管理政策議論のレジリエンス分析
- 市民社会・社会活動の安全に係る政策・制度の選択肢研究
 - 緊急事態対処に係る法制度に関する提言
 - 国家レベルの事態対処・危機管理機能に係る制度・組織設計に関する提言
 - 重要インフラ防護・レジリエンス強化のため研究政策・制度と官民連携に関する提言
 - 首都圏の緊急事態対処に係る行政的課題に関する提言

3. 各成果の概要

(1) 複合インフラシステムのモデリングとシミュレーション

災害リスクを考慮した関東圏の電力・石油需給の最適化型数値シミュレーションモデルを構築し、レジリエンス向上策の費用対効果を分析した。当該モデルは、政策担当者や事業者に対して、大災害などの稀頻度事象に備えるための投資の意思決定を支援するツールとして活用できると考えられる。分析の結果、電力部門では、東京湾岸外で電力供給能力を増強して湾岸への電力インフラの集中化を是正することが、首都直下地震のリスク緩和策として経済的効果が高いとの示唆を得た。また石油部門では、災害時に必須となる石油製品の供給不足に備えるため、災害時にも燃料備蓄放出を可能とする油槽所の強靱化が特に災害時の経済的影響を緩和する上で重要な対策であるとの示唆を得た。

つぎに、研究グループが開発中の交通流シミュレータである ADVENTURE_Mates 用の道路地図を、東京都区部を対象として整備した。微視的な交通流シミュレーションを適用するには大規模なシナリオであるため、シミュレーションを効率化・並列化するための研究開発を実施し、高速化を達成した。開発したシミュレータを用いて緊急支援物資の輸送に関するシミュレーションを行い、広域輸送基地等から地域内輸送拠点等までへの輸送経路及び輸送に要する時間を算出した。また地域ごとの交通需要・移動時間の関係、道路被害率・移動時間の関係を求め、相互依存性解析に必要な情報を明らかにした。

オープンデータを基にした配水管網の推定と、液状化データ、震度データ等を用いた地震時被害予測シミュレータの開発を行った。東京都区部主要地域の配水管網地震時被害予測図を作成し、様々な震源に対する被害予測を容易に可能となった。次に開発したシミュレータを用いて耐震化率（耐震継手の導入率）の上昇に伴う被害状況の変化を予測した。これにより、今後、耐震化率が進んで行く中で、水道事業者がインフラ復旧戦略の評価を可能とする環境を構築することができた。

通信インフラの中でも災害時に重要な役割を担う固定電話ネットワークに着目し、現実の地理的情報を用いたより詳細なモデリングと回復コスト変化を考慮したパフォーマンス評価、およびそれによるネットワークの脆弱性評価と回復（規制）計画の妥当性評価を行った。シミュレーション結果から、都心の商業地区の局は、都心の外にある住宅地区にある局と比較して、呼量の突然の増加に対して強靱ではないという結果を得た。さらに、保留時間による通信規制が、少ないコストで呼損率を減少できることを示した。以上の結果より、通信事業者が通信ネットワークの脆弱性を把握するとともに、設備や緊急時対応策のレジリエンス向上を考える上で有用な示唆が得られた。

(2) レジリエンスの総合評価と意思決定支援

市民生活・社会活動を考慮した人間中心の大都市のレジリエンス分析を行うためには、これらの活動を考慮したモデルが必要となる。そこで、「ライフラインインフラ」、「サービス・経済活動」、「市民生活」の3つのサブシステムを設定し、これらの間に存在する相互依存性を整理、モデル化すること（System of Systems アプローチ）によって社会全体のレジリエンス評価を見据えた複合重要インフラモデルのフレームワークを構築し、シミュレーションシステムを開発した。簡易モデルによる全体シミュレーションモデルの基本検証と復旧計画最適化で異なる目的関数を用いた場合のレジリエンス評価を行い、復旧計画策定や社会システムのデザインにおいては人間中心の視点が重要であることを示した。

つづいて、オープンデータから9種のライフラインインフラを含む東京23区のモデルの構築・構築法の開発を行った。東京湾を震源とする首都直下地震をベースシナリオに、湾岸エリアの被害拡大、パンデミックを重畳したシナリオを想定し、作成した東京23区モデルを用いた統合シミュレーションの動作検証を行い、東京23区モデルを用いたシミュレーションが概ね適切に動いていることを確認した。複合的相互依存性モデルによって、大都市システムの背後にある様々な相互依存性を包括的に整理、考慮することが可能となった。本成果は重要インフラ防護や都市レジリエンスに関する学術研究のための知識・技術基盤を提供するだけでなく、防災計画等の改善・修正や都市防災、危機管理に関する政策のための議論の枠組みとなり得る。

関連情報も含めた災害の状況を論理的に記述するのが災害コンテキストである。例題（災害拠点病院）に関する災害コンテキストモデルの構築と、仮定の災害シナリオを自動作成するソフトウェアの開発、

評価を行った。また、シミュレーションに向けたシナリオ作成のためのワークショップを実施し、シナリオ候補として東京都南部を震源とする地震被害予想値をベースシナリオに複合災害（インフルエンザ・パンデミック）と湾岸地域被災大のケースを選定した。これらのシナリオは複合的総合依存性を考慮した人間中心のレジリエンス評価の想定として利用した。

情報の不確かさがあっても危機発生後から直ちに復旧計画を逐次的に立てられる、リアクティブな意思決定法に基づく復旧計画法を開発した。この手法では、局所的に入手できる被害と復旧リソースの状況に基づいて、最も緊急度を要するタスクに優先的にリソースを割当てるという、単純なトリアージ原則に基づいて逐次的に復旧を計画する手法である。計算機上に構築された仮想的な複合インフラモデルを用いて復旧シミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。得られた知見は、政府、自治体、事業者を問わず緊急事態対処に携わるさまざまな組織に役立つ成果であると思われる。

政策決定の過程では、政策が機能するために対処されるべき前提や、政策が履行されることで生じる望まない副作用を批判的に分析し共有することが求められる。特定の危機管理政策に着目し、リスク（脅威や脆弱性）に対する政策の頑健性を議論学的方法を用いて分析・評価する手法を開発した。現実に行われた2つの政策議論事例の資料を分析することにより、開発手法の有効性を確認した。議会や行政機関などの政策決定者が政策議論に対する脅威を回避するために、開発した分析手法は有効であると期待される。

(3) 市民社会・社会活動の安全に係る政策・制度の選択肢研究

我が国の自然災害等（いわゆるオールハザード）への対応に係る法的枠組み、緊急事態（非常事態）に関する政府、国会等での論点整理とともに課題の構造化を行った。また、外部有識者を招聘し、政府及び地方自治体における危機管理の現状と課題について意見交換を行った。内閣府（防災）や内閣官房国土強靱化推進室における政策動向や議論などの調査分析を行うとともに、米国及び英国の危機管理政策、緊急事態対処組織、重要インフラ保護・レジリエンスに関するリスク分析活動や科学技術政策について文献調査およびヒアリング調査を行い我が国の現状と比較検討した。

以上の現状分析、国際比較調査に加えて、自然災害やパンデミックなどの脅威シナリオに対する市民生活・社会活動や国家中枢活動に不可欠な機能の確保を検討するため、首都圏を対象とし重要インフラの統合シミュレーション分析およびレジリエンス総合評価を行い、システム分析アプローチの重要性に関する科学的根拠を明らかにした。国内外の緊急事態対処に係る法制度・組織体制などの調査からも、我が国も大規模な複合災害等が想定される時代にあり、災害・緊急事態法制度及び組織体制を抜本的に見直すべきで、特に政府機関の実効的連携やリスクインフォームド政策形成の実現が必要であることが明らかとなった。これらの知見に基づき、「緊急事態対処・レジリエンス確保には、複雑なシステム挙動を扱う大規模なマネジメント能力が不可欠であり、それにはシステム分析・評価なくしては成しえない。オールハザード・アプローチを基本とし、政府機関一体（WOG）・学術界一体（WOA）・官民パートナーリングの実現が鍵である」という考え方の下、我が国の緊急事態対処に係る法制度、国家レベルの事態対処・危機管理機能の制度・組織設計、重要インフラ防護・レジリエンス強化のための政策・制度、首都圏の緊急事態対処について、内閣官房および内閣府を始めとする政府関係機関に対する以下の4課題に対する提言をとりまとめた。

- ① 緊急事態対処に係る法制度
- ② 国家レベルの事態対処・危機管理機能に係る制度・組織設計
- ③ 重要インフラ防護・レジリエンス強化のため研究政策・制度と官民連携
- ④ 首都圏の緊急事態対処に係る行政的課題

4. その他の観点からの成果

本プロジェクトの成果は重要インフラ防護や危機管理政策の範囲にとどまらず科学技術イノベーション全般に資するものと考えている。社会と技術が複雑に絡み合った現代における科学技術イノベーションにおいては、両者の相互連関を考慮した枠組みが不可欠である。本プロジェクトではハードなライフラインインフラだけでなく、サービス・経済活動と市民生活をサブシステムに含む包括的な技術社会システムモデルを提案し、多様なステークホルダーの利害を考慮した人間中心の評価を可能にした。しかし、従来の相互依存性解析においてここまで包括的な取組みを行った研究は世界的にもほとんどなかった。もともと、レジリエンスは防災や危機管理のみならず、生態、環境、社会、経済、臨床心理などのさまざまな分野で用いられるようになった概念であり、その分野横断的な性質を持った概念である。本プロジェクトの成果は、ますます複雑化する技術社会システムを対象としなければならないこれからの科学技術イノベーションにおける評価・判断の基準として、レジリエンスは有力な概念であることを示した。

本プロジェクトが主催したわけではないが、研究代表者の所属機関が主催・共催したレジリエンス工学に関する下記の国際ワークショップ／セミナーにおいて本プロジェクトの概要を紹介し、意見交換を行った。本プロジェクトのような包括的な研究は海外でも関心が高いことから、レジリエンス工学、特に重要インフラ防護や危機管理の海外研究者とのネットワークの構築に大きく貢献した。

- 2nd Deans Forum Workshop on Resilience Engineering, Paris, 2013.11.18-20
- 3rd Deans Forum Workshop on Resilience Engineering, Tokyo, 2015.11.30-12.1
- UTokyo-ETH Singapore Joint Seminar on Resilience Engineering, Singapore, 2016.12.9-10

また、本プロジェクトで雇用したポスドクは2名、関連テーマで論文を書いて卒業した(予定を含む)学生は学部生4名、修士院生3名であり、若手の育成にも貢献した。

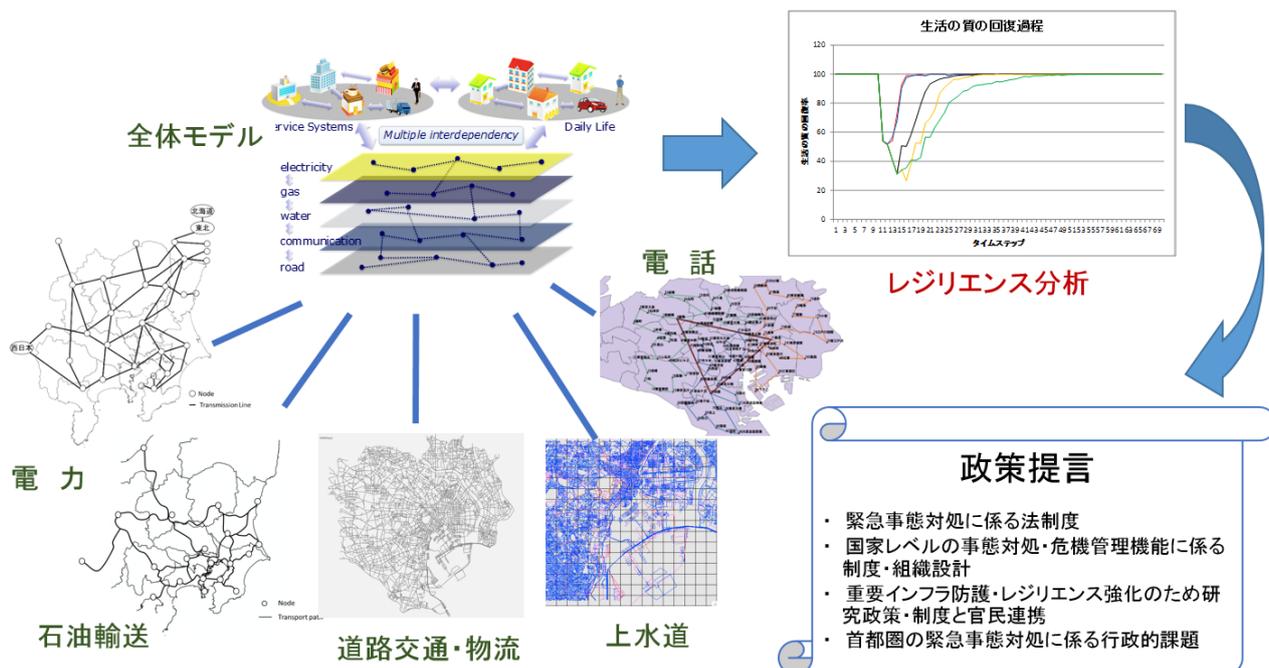
5. 発展の可能性

本プロジェクトではオールハザードに対応した複合重要インフラのレジリエンス分析を目指したが、分析できたのは首都直下地震をベースシナリオに、湾岸部の機能喪失、パンデミックが重畳したシナリオにとどまった。その最も大きな理由は、現実的な規模の都市モデルではシミュレーションに必要な計算量が大きくなり、計算時間がかかりすぎることにある。交通流シミュレータについては並列化・高速化の改良を行ったが、全体モデルに対しては研究リソース的にその余裕はなかった。今後は全体モデルについても並列化・高速化を検討し、京コンピュータなどの超並列プラットフォームに実装する対策が考えられるが、そのためにはさらに本格的な研究投資が必要である。

つぎに、政府・行政や事業者の危機管理専門家を招いて研究成果の紹介や議論の機会を設けるべく努力したが、アウトリーチは全く十分とは言えない。本プロジェクトが扱う課題は組織横断の度合いが甚だしいために、関係組織の一部に協力してもらっても問題意識を社会に浸透させることが難しい。今後は政策提言の一項目としてあげたような研究政策・制度と官民連携の恒久的な仕組みを構築し、単独のプロジェクトを超えた取組みを行うことが望まれる。

ところで、第5期科学技術基本計画で「Society 5.0の実現」が掲げられ、予算化のために具体的研究テーマが検討されている。必要となる基盤技術としてはIoTシステム、ビッグデータ解析、AIなどが、実現すべきコア3システムとしてエネルギーバリューチェーンの最適化、高度道路交通システム、新たなものづくりシステムが検討されている。しかしSociety 5.0を標榜するからには従来の価値観のICTによる強化・拡張に終るべきではなく、Society 4.0が抱える問題の克服を目指すべきであろう。もともとレジリエンスは防災や危機管理に限定されない広い概念であり、Society 5.0 = レジリエントな社会であるべきならば、本プロジェクトで提案したような技術がその実現のためのプラットフォームとなることが期待できる。

6. 付録



複合重要インフラのレジリエンス分析に基づく政策提言

7. 主な成果発表

- ・ 古田一雄、小宮山涼一、藤井秀樹、菅野太郎、木藤浩之、吉村 忍、山田知典（東京大学）「重要インフラのレジリエンス分析と危機管理政策(1)ー全体概要ー」安全工学シンポジウム 2016 講演予稿集、332-333、東京、2016.7.8.
- ・ 小宮山涼一、松澤宏務、藤井康正（東京大学）「重要インフラのレジリエンス分析と危機管理政策(2)ー関東圏の電力・石油需給ー」安全工学シンポジウム 2016 講演予稿集、334-337、東京、2016.7.8.
- ・ 藤井秀樹、白崎旬、内田英明、吉村忍（東京大学）「重要インフラのレジリエンス分析と危機管理政策(3)ー交通物流ー」安全工学シンポジウム 2016、東京講演予稿集、338-339、2016.7.8.
- ・ 鈴木 尊、吉田佑一、菅野太郎、古田一雄（東京大学）「重要インフラのレジリエンス分析と危機管理政策(4)ー複合的相互依存性を考慮した東京 23 区のモデリングと災害復旧シミュレーションー」安全工学シンポジウム 2016 講演予稿集、340-343、東京、2016.7.8.
- ・ 谷口武俊（東京大学）「複合リスクのガバナンスに向けて(3)」東京大学政策ビジョン研究センター 複合リスク・ガバナンスと公共政策研究ユニット活動報告、2015.3.2. <http://pari.u-tokyo.ac.jp/unit/crg/2015/03/02/post-310/>
- ・ レジリエンス政策研究会開催概要報告、東京大学政策ビジョン研究センター 複合リスク・ガバナンスと公共政策研究ユニット、<http://pari.u-tokyo.ac.jp/unit/crg/category/resilience-study/>
- ・ V. Lubashevskiy, T. Kanno, K. Furuta (2016), "Resource Redistribution under Lack of Information: Short-Term Recovery after Large Scale Disasters", Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 3/1, 1-16, doi: 10.15748/jasse.3.1
- ・ N. Mita, H. Uchida, H. Fujii, S. Yoshimura (2016), "Speedup of Dynamic Route Search for Large-scale Microscopic Traffic Simulation", Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering (accepted)