

戦略的創造研究推進事業（社会技術研究開発）

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

研究開発プロジェクト（特別枠）

「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」

（英語表記 Resilience Analysis for Social Safety Policy）

研究開発実施終了報告書

研究開発期間 平成 25 年 10 月～平成 28 年 9 月

古 田 一 雄

東京大学 教授

目次

1. 研究開発目標	2
2. 研究開発の実施内容	2
2-1. 実施項目	2
2-2. 実施内容	3
3. 研究開発成果	26
3-1. 成果の概要	26
3-2. 各成果の詳細	27
3-3. 学術的成果、人材育成やネットワーク拡大への貢献等	38
3-4. 成果の発展の可能性	39
4. 関与者との協働、成果の発信・アウトリーチ活動	39
4-1. 研究開発の一環として実施したワークショップ等	39
4-2. アウトリーチ活動	41
4-3. 新聞報道・投稿、受賞等	42
5. 論文、特許等	42
5-1. 論文発表	42
5-2. 学会発表	43
6. 研究開発実施体制	45
6-1. 体制	45
6-2. 研究開発実施者	
6-3. 研究開発の協力者・関与者	

1. 研究開発目標

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創出し、この社会的課題の解決に寄与することを目標とする。すなわち、国土強靱化基本法成立後、内閣府に新たに設置が想定される司令塔的役割を担う組織に対し、重要インフラのレジリエンス強化のための政策・制度設計に関する選択肢を制度設計の議論のたたき台として提供することを考える。また、事例分析結果および包括的なシナリオシミュレーション分析結果を含むシナリオライブラリや、重要インフラの復旧プランニングの手法を開発し、危機対応の際の意思決定支援の手段として内閣府、首都圏自治体、重要インフラ事業者ならびに監督官庁へ提供する。

2. 研究開発の実施内容

2-1. 実施項目

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

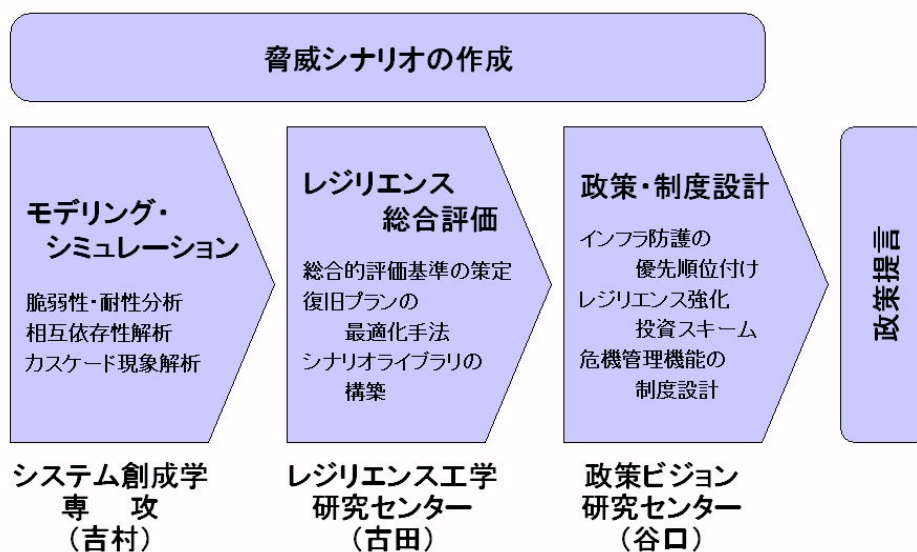
相互依存性を考慮しつつ重要インフラをモデル化する手法と、モデルに基づいて複合インフラシステムの挙動をシミュレーションするシステムを開発した。脅威に対する脆弱性・耐性分析と、その評価結果の見える化を行った。また、シナリオ共創の手法に基づいて、脆弱性・耐性分析の前提となる脅威シナリオを共創的に作成することを試みた。

レジリエンスの総合評価と意思決定支援に関する研究

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を検討した。この枠組みに基づき、重要インフラの復旧プランを最適化するための手法を開発した。さらに、危機管理政策議論の整合性・頑健性を論理的に分析する手法を開発した。

市民社会・社会活動の安全保障に係る政策・制度の選択肢研究

我が国の緊急処理事態に係る法制度や政府等の危機管理機能の現状分析、海外の政府機関等の緊急対応体制との比較検討、上記技術的研究により得られた知見を踏まえ、政策提言として取りまとめた。また成果の社会実装に向け、政策立案関係者や産業界関係者などを交えたワークショップ等を開催し情報発信を行った。



研究開発実施項目

2-2. 実施内容

2-2-1. 災害リスクを考慮した関東圏のエネルギー需給分析

(1) 分析の目的

現在、今後30年以内にM7クラスの首都直下型地震が70%の確率で発生し、深刻なインフラ被害を及ぼすことが懸念されており、その影響は首都圏にとどまらず、日本全体のエネルギー供給を大きく毀損する可能性がある。そのため、東日本大震災の事例を踏まえ、エネルギー需給のレジリエンス向上を図ることが極めて重要であり、その対策が求められている。ただし一般に、発生頻度が低い出来事（稀頻度事象）に備えるための投資は、事業性の観点から見た場合、一般的にコスト高であり、投資回収が困難となる傾向があるため、経済合理性の考慮が不可欠である。そこで本研究では、重要なエネルギー源である電力および石油の需給について、災害リスクを考慮したコスト最小化型の数理モデルを構築、利用することにより、レジリエンス向上策の一部として、非常用電源の燃料備蓄、地域間電力連系線の増強、油槽所の強靱化等の費用対効果に関して分析を実施した。

(2) 数値シミュレーションモデルの構築

分析に際し、エネルギーの相互依存関係の理解が重要となる。災害時の電力不足解消に有効な石油火力や非常用電源の利用のためには、それらに対する燃料供給の確保が必要となるが、石油インフラの毀損により燃料供給が滞り、災害時に安定的に利用できなくなれば、石油供給不足が電力供給停止を引き起こす可能性がある。一方、石油精製には電力が必要となるが、災害時の電力供給設備の損壊により電力供給停止が発生し、石油精製に必要な電力を十分に確保できない場合は、電力供給停止が石油供給不足を引き起こす可能性がある。このような電力と石油の相互依存性を考慮した上で、本研究では災害時のエネルギーの安定供給向上策を定量的、包括的に分析した。東日本大震災等の経験を踏まえれば、石油は非常時のエネルギー確保において特に重要な役割を担うと定性的に考えられているが、緊急時の石油の価値を、インフラを総合的に考慮した上で定量的に分析した点に本研究の特徴がある。

なお本研究のモデルは、次に述べる電力需給モデルと石油需給モデルから構成され、目的関数

はシステム全体の総コストである。

① 電力需給モデル

本研究では、関東圏の電力基幹系統を詳細に考慮した電力需給モデルを構築した（図1）。関東圏と東北・西日本を接続する地域間連系線も考慮してモデル化している。各ノードには発電設備（石炭火力、石油火力、ガス火力、ガス複合火力、原子力、水力、非常用電源）の設備容量と電力需要を考慮する。需要は家庭・業務・産業の3業種を考慮し、各部門の災害発生時の節電行動も、電力価格に対する需要の変化(需要曲線)として考慮する。モデルの制約条件として、電力需給バランス制約、設備容量・出力制約、電力貯蔵設備制約、充放電制約、送電制約等を考慮している。

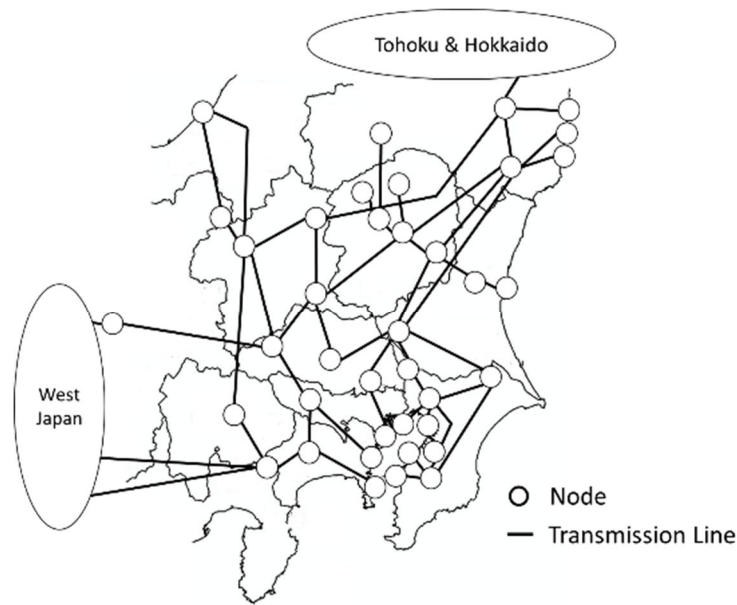


図1 電力系統モデル

② 石油需給モデル

石油需給モデルでは、内航船および鉄道による製油所から油槽所への石油製品輸送、および関東圏では油槽所から需要家へのタンクローリー輸送、流通を考慮している（図2、図3）。各製油所では詳細な石油精製フローを考慮し、製油所内の各精製設備の処理能力、油種別（揮発油、ナフサ、灯油、軽油、A重油、C重油、LPガス）の石油製品需要、油槽所の貯油能力、タンクローリーの容量、需要家備蓄量のデータを前提条件として考慮する。また各輸送経路には、輸送手段および距離に応じた輸送コストも考慮している。モデルの制約条件として、製品供給制約（発電用・非発電用）、石油輸送制約、備蓄放出制約、需要家備蓄制約（発電用・非発電用）、石油精製制約、製品輸入量上限制約、製品輸出制約、需要抑制制約を考慮した。

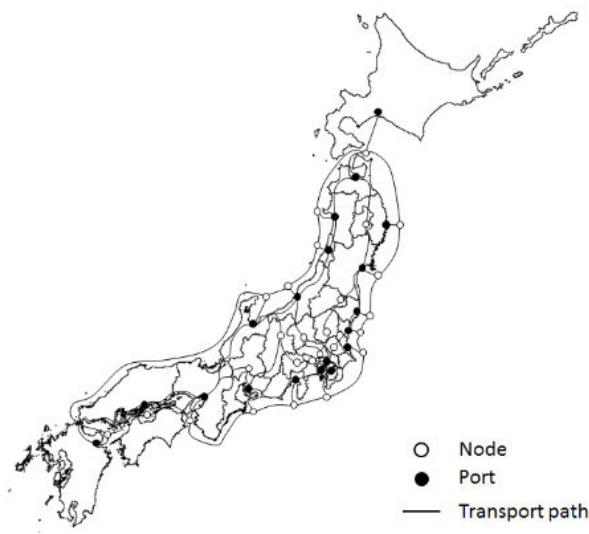


図2 石油広域輸送モデル

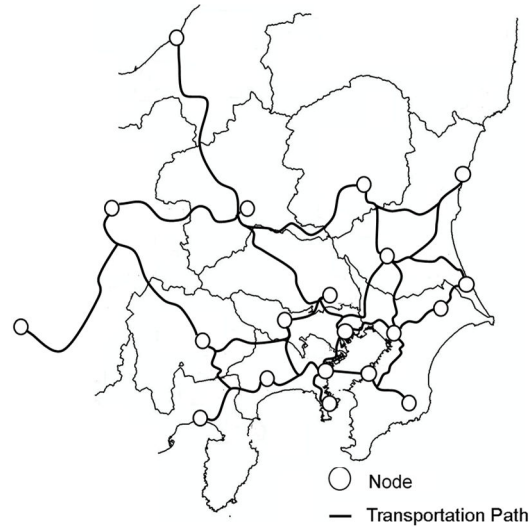


図3 タンクローリー輸送モデル

(3) 確率動的計画法による定式化

本研究では大規模地震リスクの発生確率を数理的に考慮する。災害発生による電力・石油インフラの毀損を、それらの利用可能率低下としてモデル化する。この想定の下、非常用電源の燃料備蓄、油槽所の民間備蓄、サービスステーション (SS) の流通在庫を状態変数とした確率動的計画法によるコスト最小化型のモデル ((1)-(3)式) を構築した。

$$V_t(\mathbf{St}_t, i) = \min_{\mathbf{u}_t} \left\{ g_t(\mathbf{St}_t, i, \mathbf{u}_t) + Pe_t + e^{-\gamma} \sum_j P_{ij} V_{t+1}(\mathbf{St}_{t+1}, j) \right\} \quad (1)$$

$$\mathbf{St}_{t+1} = A_t \mathbf{St}_t + B_t \mathbf{u}_t \quad (2)$$

$$V_{T+1}(\mathbf{St}_{T+1}, i) = 0 \quad (3)$$

$t \in \{0, \dots, T-1\}$: 時点 (日), $V_t(\cdot)$: 時点 t から最終時点 $T-1$ までの総コスト期待値 (円), i, j : インフラの被災シナリオ, \mathbf{St}_t : 石油貯蔵量 (kl), \mathbf{u}_t : システム全体の設備運用, $g_t(\cdot)$: システム運用コスト (円), Pe_t : 節電・省エネコスト (円), P_{ij} : 状態遷移確率, γ : 割引率, $A_t, B_t, \mathbf{c}_{t,i}$: 定数行列・ベクトル

コスト関数 $g_t(\cdot)$ は既に述べた電力・石油需給に係る工学的・社会的な制約条件の下で求める。さらに制約条件には電力・石油の相互依存性として、石油製品供給停止に起因する非常用電源と集中型石油火力の電力供給停止の可能性や、停電に伴うSS (ガソリンスタンド) の営業停止や製油所における石油精製停止の可能性を考慮している。電力需給モデルや石油需給モデル内の制約条件式は全て線形式であり、(1)-(3)式も線形の数式として定式化している。

(4) 次元の呪いと切除平面法による近似解法

確率動的計画法による定式化は不確実性を考慮する上で有効であるが、状態変数 \mathbf{St}_t の高次元化に伴い、「次元の呪い」と呼ばれる問題により、求解難易度が指数関数的に上昇する問題点がある。本研究では切除平面法による近似解法を用いてこれに対処する。切除平面法は、線形計画問題の凸性により関数 $V_t(\cdot)$ 上の点 \mathbf{St}_t^* において成立する関係式(4)を利用する。この点をサンプル点と呼び、

複数のサンプル点において(4)式の右辺で表される超平面を定義することで関数 $V_t(\cdot)$ は図4のように近似される。本研究では繰り返し計算を通じて関数 $V_t(\cdot)$ を近似して(1)-(3)式の問題を解く。

$$V_t(\mathbf{St}_t, i) \geq V_t(\mathbf{St}_t^*, i) + \left(\frac{\partial V_t(\mathbf{St}_t^*, i)}{\partial \mathbf{St}_t} \right)^T (\mathbf{St}_t^* - \mathbf{St}_t) \quad (4)$$

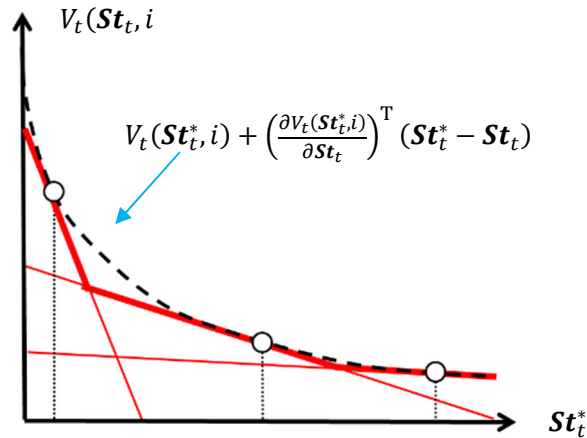


図4 切除平面法による関数 $V_t(\cdot)$ の近似

(5) 計算の緒前提

大規模地震の発生により東京湾岸地域で表1の被害が生じると想定した。災害発生確率は平均で30年に一度の頻度で発生すると想定し、復旧確率は平均して2週間で復旧すると想定する。分析対象期間は20日間とし、電力供給設備および需要、油槽所の民間備蓄量は2013年夏季の実績値、石油供給設備は2015年の実績値を用いる。SSの流通在庫は各地点で需要の3日分が存在すると想定する。原子力発電の稼働、非常用電源用燃料の備蓄量、災害時の油槽所の在庫出荷機能の有無はケースごとに定める。本研究のモデルでは 2^{19} 通りのシナリオ分岐を考慮し、各分岐点で356個の状態変数について不確実性を考慮した意思決定が行われる。厳密解法での計算は、計算機の物理的制約からほとんど不可能であるため、本研究では切除平面法を利用した近似解法によって数値シミュレーションを実施する。

表1 災害シナリオの想定

電力システム	石油システム
発電設備の稼働停止	製油所の稼働停止 油槽所の入荷機能の停止 首都圏近郊の鉄道交通の封鎖 SS営業率の低下(70%) タンクローリーの走行速度低下(30%) アクアライン・恵那山トンネル・関越トンネル封鎖

(6) 計算結果

基準ケースでは、原子力発電は全国で利用不可、非常用電源用の燃料は各地点の業務・産業部門の需要家において3日間最大出力で運転可能な量を保持、油槽所の災害時における在庫出荷機能は停止すると仮定して分析を行う。

図5、図6にガス火力と地域間連係線の潜在価格(シャドープライス)を示す。この潜在価格は、価値関数 $V_0(\cdot)$ (分析対象期間内のシステム総コスト)のコスト削減効果を表している。すなわち、ガス火力もしくは地域間連係線の単位容量増強による災害リスクを考慮したコスト期待

値の削減効果を表している。分析の結果、電力システムに関しては、東京湾岸に立地するノード（例えば富津）よりも、首都圏域外のノードでのガス火力増強の方が経済的価値が高い傾向にあることが分かった（図 5）。この結果は、関東圏の電力需給システムにおいて、東京湾岸よりも湾岸外で発電所を増強することで湾岸への電力設備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ことを示唆している。また、災害時の電力対策として、西日本からの電力融通は恒常的に送電容量に達していることから、周波数変換設備（新信濃 FC、佐久間 FC、東清水 FC）の増強によるコスト削減効果が相対的に大きいことが分かった（図 6）。このように本モデルの利用により、災害リスクに対する電力システムの冗長性確保の経済的価値を定量的に評価できる。

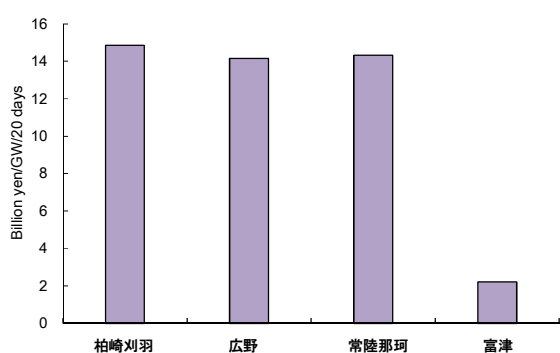


図 5 ガス火力新設の潜在価格

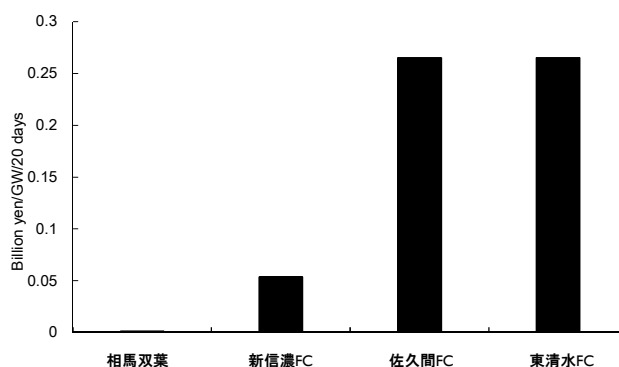


図 6 地域間連系線増強の潜在価格

基準ケースでの検討を踏まえ、対策(1)原子力発電所の稼働、対策(2)燃料備蓄の強化（7日）、対策(3)油槽所強化（東京湾岸の民間備蓄放出が可能に）、対策(4)タンクローリー走行速度の改善、の4対策の経済的価値を分析する。対策(1)は原発が東京湾岸以外に立地していることから、その稼働による電力システムの冗長性向上の評価を目的としている。対策(2)では非常用電源の利用は燃料備蓄量に依存するため備蓄量を3日分から7日分に増強することを想定する。対策(3)、(4)は東京湾岸の石油流通の脆弱性克服を踏まえた対策である。対策(3)は油槽所強化によって災害時に東京湾岸において民間備蓄の放出を可能とする対策であり、対策(4)は災害時のタンクローリーの走行速度を30%から50%に改善することを考える。表2のケース設定で、分析対象期間におけるシステム総コスト期待値の低減効果を分析し（基準ケースとのコストの差分）、各対策の経済的効果を分析した。

表 2 ケース設定

	対策(1) 原発稼働	対策(2) 非発燃料 備蓄増強	対策(3) 油槽所出 荷強化	対策(4) ローリー 速度改善
Case 1	○	—	—	—
Case 2	○	○	—	—
Case 3	—	—	○	—
Case 4	—	—	○	○
Case 5	○	○	○	○

図 7 に各ケース（表 2）の基準ケースに対するシステム総コスト期待値の削減効果を示す。全ての対策に一定のコスト削減効果が見られるが、特に油槽所強化によるコスト削減効果が大きいことが分かった。要因として、電力と石油製品の価格弾性値を比較した場合、石油製品の価格弾

性値が相対的に小さいこと（災害時に必須の燃料のため、需要抑制が難しいこと）が挙げられる。このため、石油製品の需要抑制コスト削減が重要になり、石油不足の解消策が関東圏のエネルギーシステム全体の期待コスト削減に貢献するのである。

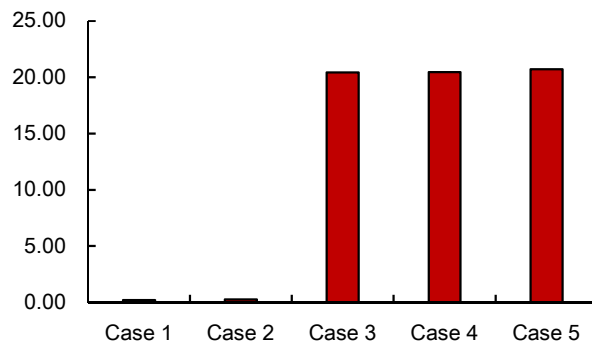


図7 総コスト期待値の削減効果[単位：10億円]

2-2-2. 交通・物流ネットワーク

交通・物流ネットワークにおいては、対象となる東京都区部の道路ネットワークデータについて、フリーの地図作成プロジェクト **OpenStreetMap** (<https://www.openstreetmap.org>)で作成・公開されている地図データを研究開発実施者らが開発中のマルチエージェント交通流シミュレータ **ADVENTURE_Mates** にインポートしてシミュレーションを実施することとした。本プロジェクトでは首都直下地震の発生を想定した際の交通や緊急支援物資の輸送を扱う性質上、細街路を省略した地図を2つ用意した。1つは緊急輸送道路に指定された道路を含む主要道路のみを抽出した地図（以降「主要道路地図」と表記する）であり、もう1つは主要道路地図より精密な、片側1車線以上の道路をすべて抽出した地図（ただし一部の高速道路等を除く：以降「詳細道路地図」と表記する）である。主要道路地図は緊急物資の輸送ルートの算出に、詳細道路地図は地図上の2点間の距離や所要時間の算出に用いた。主要道路地図と詳細道路地図をそれぞれシミュレータ上で可視化したものが図8である。



図8 シミュレーションに使用した道路地図（左：主要道路地図，右：詳細道路地図）

道路地図は交差点をノード、単路部をリンクとするネットワークとしてモデル化される。主要

道路地図のネットワークの規模は 1,913 ノード、2,189 リンクであり、詳細道路地図では 8,954 ノード、12,566 リンクであった。特に詳細道路地図において微視的な交通流シミュレーションを実施するには大規模な問題設定となっており、また主要道路地図においても、最適化等の反復的な計算を行うためには計算時間の短縮が要請される。そのため、ADVENTURE_Mates のボトルネックの調査および特定されたボトルネックを解消するための研究開発を実施し、シミュレーションの実行速度の向上を確認した（図 9）。道路に関するデータを保持する方法の改良により、特に車両エージェントの認知プロセスに関する計算速度が向上し、全体として 3 倍程度の高速化を実現した。

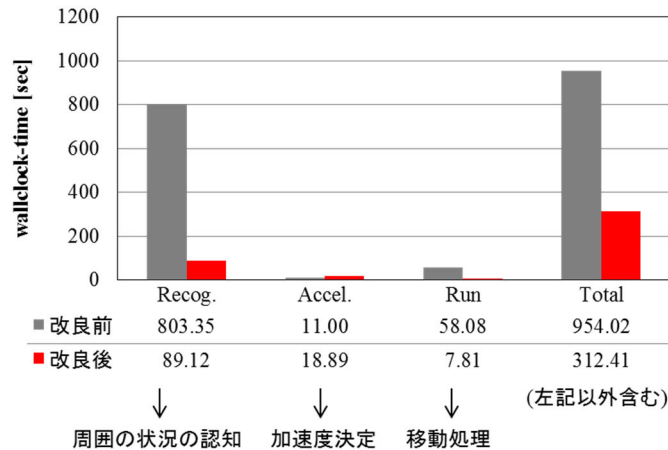


図 9 シミュレーションの計算速度の向上

またこれと並行し、大規模計算を高速に実施するための領域分割法による並列計算についても検討した。従来は既存研究をもとに Recursive Coordinate Bisection 法を利用していたが、道路ネットワークの特性を考慮し、効率の良いグラフ分割法を採用した並列計算法を提案し実装した（図 10）。適切な負荷分散を行うことにより並列加速率を高められること、本手法が計算速度のさらなる向上に役立つことを示した（図 11）。

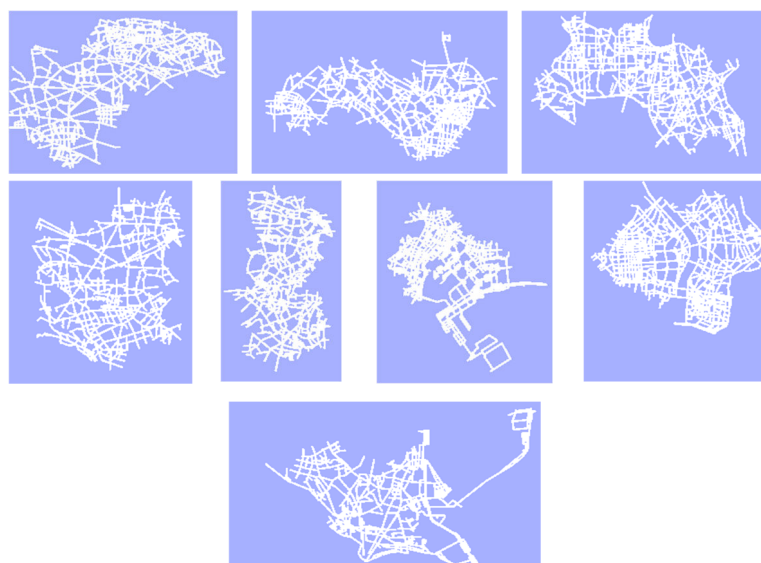


図 10 詳細道路地図を 8 分割した例

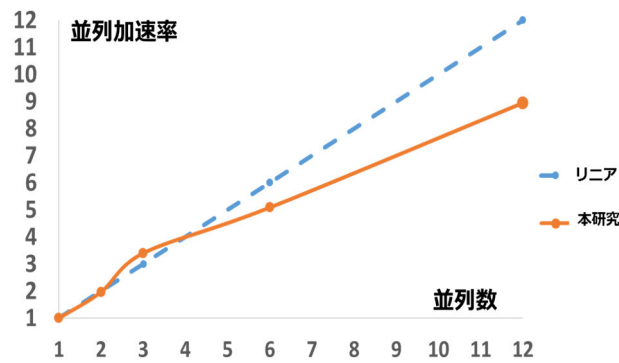


図 11 並列加速率の評価

上記の開発・改良を施した交通流シミュレータを用いて、震災発生後 3 日目以降を想定した交通物流機能の評価を実施した。

まず、東京都防災会議が定めた地域防災計画（震災編）をもとに、広域輸送基地（20 箇所）および水上輸送基地（63 箇所）（以降まとめて「輸送基地」と表記する）から、地域内輸送拠点（38 箇所）および都備蓄倉庫（12 箇所）（以降まとめて「輸送拠点」と表記する）までの緊急支援物資の輸送をシミュレータで再現した。シミュレーションには主要道路地図を用いた。シミュレーション結果から、各輸送拠点に対し最小時間で到達できる輸送基地を明らかにし、またその輸送に要する時間を算出した。結果を図 12 に示す。図中の白丸で示される地点が輸送基地であり、色付きの丸で示される点が輸送拠点である。輸送拠点の色およびカラーバーは輸送時間（単位：分）を意味する。また各輸送拠点に対して最小輸送時間を達成した輸送基地を線で結んでいる。各施設の被災や渋滞等の発生がなければ、遅くとも 30 分程度で各輸送拠点にアクセス可能であることを示している。

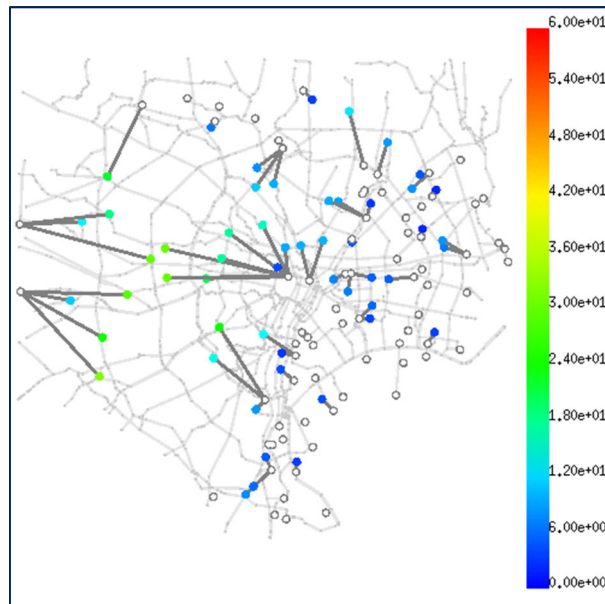


図 12 輸送基地・輸送拠点間の依存関係と輸送時間

上記の結果は道路被害および交通渋滞を想定していない場合の結果である。本プロジェクトの目的の 1 つは統合的な復旧過程のシミュレーションであり、そのためには道路の被害率と移動時

間との関係、あるいは交通需要と移動時間との関係が必要である。復旧過程の最適化を念頭に入れ、データ量の圧縮のために都心の道路ネットワークを東西方向、南北方向とも 1km 間隔のメッシュで簡略化するが、各格子点間の移動に関する特性を保持する必要がある。詳細道路地図を用いた交通流シミュレーションを実施し、格子点に相当する地点間の交通量・旅行時間（移動時間）関係および道路被害率・旅行時間（移動時間）関係を求めた。例として、図 13 に新宿区西口エリアから明治神宮北西エリアへ至る移動の被害率・旅行時間関係を示す。ここで、被害率とは道路を確率的に切断する際の確率として用いた。図に示すのは 10 回の試行による平均旅行時間と最悪旅行時間である。このようにして求めた道路ネットワーク特性を用いることで、インフラ復旧戦略の評価が可能となる。

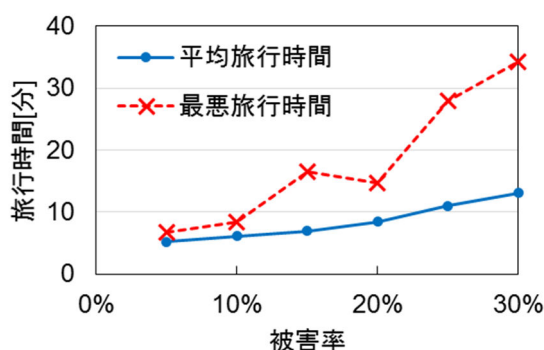


図 13 道路の被害率と旅行時間の関係の例

2-2-3. 上水道システムのレジリエンス分析

上水道システムのモデルについては、配水管網の詳細データが入手困難であるためオープンデータを基にした配水管網の推定と、推定の結果得られた上水道モデルに対して内閣府中央防災会議において同じくオープンデータとして公開されている液状化データ、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。

配水管網の推定においては先行研究を参考に道路ネットワークデータを基にした推定を行った。なお、ここで用いる道路ネットワークデータは前述の交通・物流ネットワークにおいて構築したものを利用した。単純化のため配水管は全てダクタイル鋳鉄管（東京都内では現在約 98%がダクタイル鋳鉄管）であると仮定して実際の東京都の水道管管径割合を参考に、道路ネットワークにおける車線数と管径の対応を表 3 のように設定して被害予測シミュレーションに必要な管種管径係数を算出した。また、被害予測においては配水管網の耐震化（耐震継手）の有無が重要なファクターとなるため国土交通省国土制作局国土情報課が提供する国土数値情報ダウンロードサービスから公共施設位置データを取得し、対象とする東京都区部主要地区に存在する警察機関、病院、消防署などの 2,659 か所を重要施設として位置づけ、これらの重要施設から近接する給水地点までの配水管網が耐震化されているとした。東京水道施設整備マスタープランによると、東京都は首都中枢機関、救急医療機関、避難所や主要な駅への供給ルートを優先して耐震化を進めており、本プロジェクトの耐震化方針はこれに従ったものである。図 14 に上水道システムのモデリングで構築した東京都区部の配水管網、重要施設と給水地点を示す。

表 3 管径と車線数の対応

管径(mm)	-75	100-250	300-450	500-900	1000-
車線数	1	2	3-4	5-6	7-10
管種管径係数	0.60	0.03		0.09	0.05

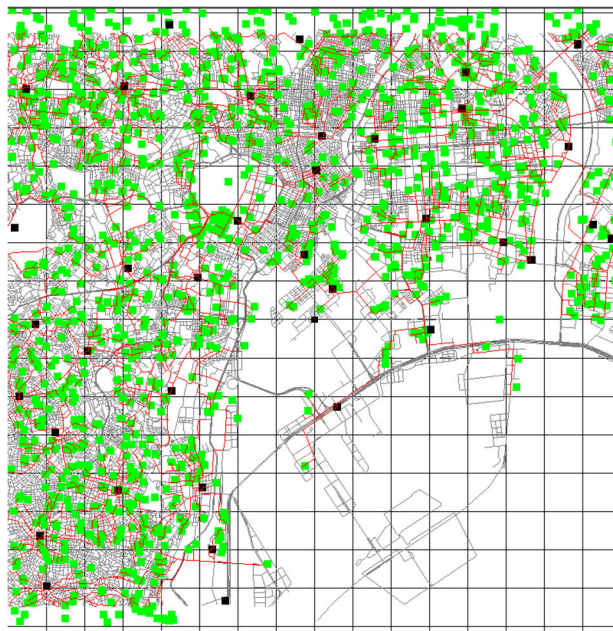


図 14 東京都区部主要地域の上水道網、重要施設（緑）と給水地点（黒）

次に被害予測シミュレータの開発においては新測地系緯度経度に基づいた地域メッシュ分割を導入することにより、内閣府中央防災会議においてオープンデータとして公開されている液化化データ、震度データ等を利用可能として高度かつ詳細な被害予測シミュレーションを可能とした。

2-2-4. 固定電話ネットワークのレジリエンス分析

東日本大震災においては、生活を支える重要インフラである情報通信インフラも通信ビル設備の倒壊・水没・流失、回線の損壊、電柱の倒壊などにより大きな被害を受けた。具体的な被害としては、固定通信において NTT 東日本・KDDI・ソフトバンクテレコム の 3 社で約 190 万回線が被災した。また、通信の集中により混雑が生じ、通信各社で固定電話について最大 80%~90% の通信規制を実施した。災害時の安否確認のために電話を利用しようとする人は多い。メールや SNS などが普及した現在でも直接声を聞くことができる電話は災害時の安否確認のための重要なツールである。災害時に電話を必要とする、出来るだけ多くの人にサービスを提供することは重要であると考えられる。

そこで、本研究では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うことを目的とする。これにより、通信ネットワークの脆弱性を把握するとともに、信頼性強化のための政策・制度設計に関する選択肢の提供に資すると考えられる。

本研究では、システムレジリエンスを定義評価するためのインフラレジリエンス分析方法論アプローチ (Infrastructure Resilience Analysis Methodology approach, Biringer, Vugrin, & Warren, 2013) を採用した。本アプローチでは、レジリエンスは文脈的な概念で、維持または回復のためのコストと直接関係している。本研究では、レジリエンスを維持または回復のための一定コストという条件の下、呼損率 (Call loss rate) を維持 (または低減) する能力として定義する。目標システム性能 (TSP: Targeted System Performance) とは、「理想」状態でのシステムの性能である。特に、支障がない伝送が期待される電気通信のトラフィック量である。システムインパクト (SI: System Impact) とは、TSP からの偏差として定義される。この方法論では、SI の変動は呼損 (Call loss) を表す。全回復コスト (TRE: Total Recovery Effort) は、回復期間

回復作業コストの関数で、ここでは電気通信の規制措置を採用する社会的コストとして定義する。この値は、0 から 1 までの間の数値である。

本研究でのネットワーク用論理トポロジーモデルは、スケールフリーネットワーク (Scale-free Network) から構成されている (図 15)。従って、任意の 2 中継局間の伝送路は、その間のリンクで利用可能な最短経路と見なされていた。

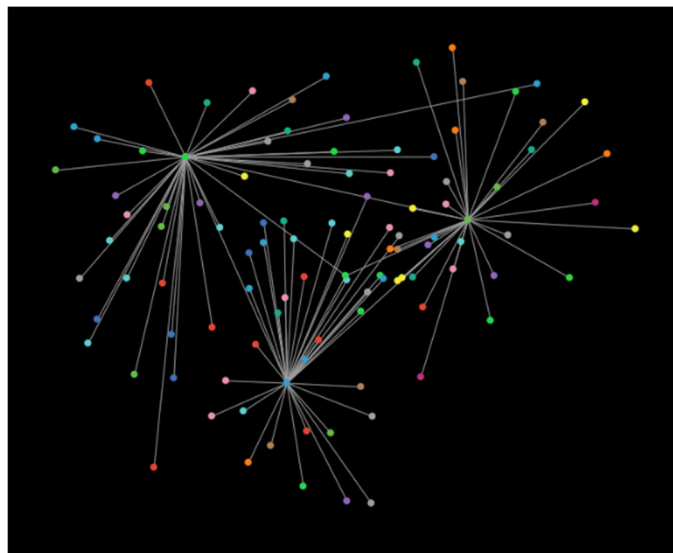


図 15 論理トポロジーネットワークモデル

ターン毎に、東京地区のある地区から別の地区に呼が発生し、NTT により提供されたデータに従った平均を持つポアソン分布として呼は流れる。保留時間 (hold time) も、全国の統計から与えられる分布に基づき決定し (総務省, 2014)、生起した呼についてその分布に従って発生させた保留時間を現時刻に足したものを終了時刻として記憶する。呼はそれが終了するまで、ある地区の局から別の局へのリンクの回線を占有する。全てのリンクについて回線が空いていれば通信は成功する。1 つでも回線の空きがないリンクがあれば通信は失敗し、損失呼となる。呼損は、各ターン最後に計算された。呼損率は現時刻で損失呼となった呼数の生起した全呼数に対する割合で求められる。1 ターンは実際には 1 分であり、本プロセスは電話ネットワーク性能/24 時間以内の呼損を繰り返しシミュレートする。

シミュレーションを行った。シミュレーションの妥当性を検証するため、平常状態で加わる呼量を変化させた場合の呼損率がアラン B 式で求めた呼損率と合致することを確認した (図 16)。次に、パラメータを変化させてシミュレーションを行った。検証されたモデルをベースラインモデルとして利用し、異なるシナリオ設定を適応し、その結果を比較した。システムレジリエンスを分析するため、別の 2 つのシナリオも考案した。一つは呼量規制、もう一つでは保留時間規制を採用した。TSP と SI の値がコントロールされ、SI を減少する方法を評価するため、TRE の値が比較される。

シミュレーションが実施され、固定回線の電気通信のトラフィック負荷の増加の影響を中継局の呼損率と比較した。図 17 には、災害が原因で電気通信トラフィック量が急増した (3 倍と 5 倍) 状況下での東京 23 区の各中継局の 24 時間の呼損率を示した。示されるように、ある局は他の局より呼損率が低く強靱である。これらの局は、都内の商業地区よりも東京郊外の住宅地区にあると考えられる。

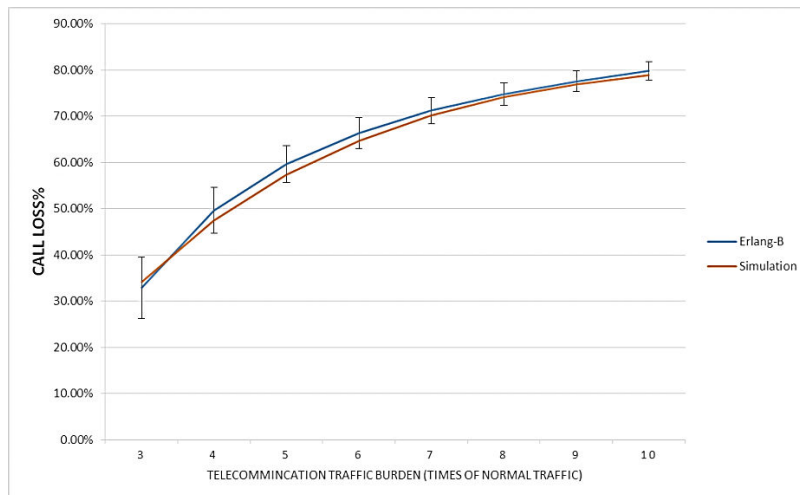


図 16 シミュレーションの検証

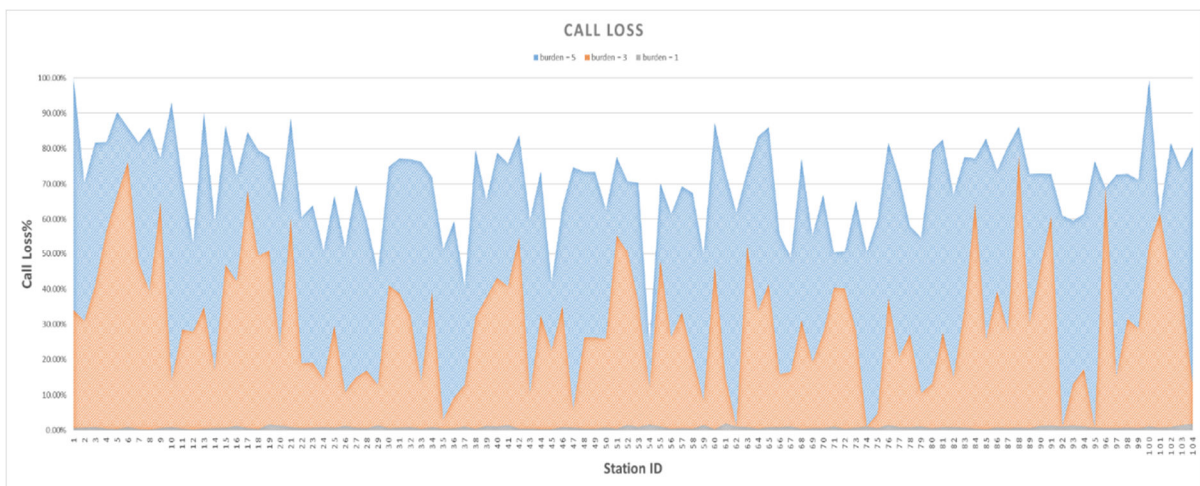


図 17 各局の脆弱性評価

さらに、通信規制方針がどのように電気通信システムのレジリエンスに影響するかもシミュレーションで調べられた。規制手法は、呼量規制と保留時間規制に分割された。両規制とも、全量の最大 50%削減に設定された。これは、本研究での TSP でもある。図 18 には、電気通信トラフィック量が急増した (5 倍) 状況、同一 TSP と期間条件下での呼量と保留時間の規制間の比較を示した。保留時間規制を採用したシステムでは、同様なレベルの SI 削減をより少ないコスト (TRE) で達成可能である。

本研究では、東京 23 区の固定回線の電話通信ネットワークをモデル化し、災害時の呼損率、回復コストの観点からネットワークのレジリエンスを評価した。本モデルでは、呼損率を推定するために調整された呼量のシミュレーションを実施することにより、各局の脆弱性評を評価した。

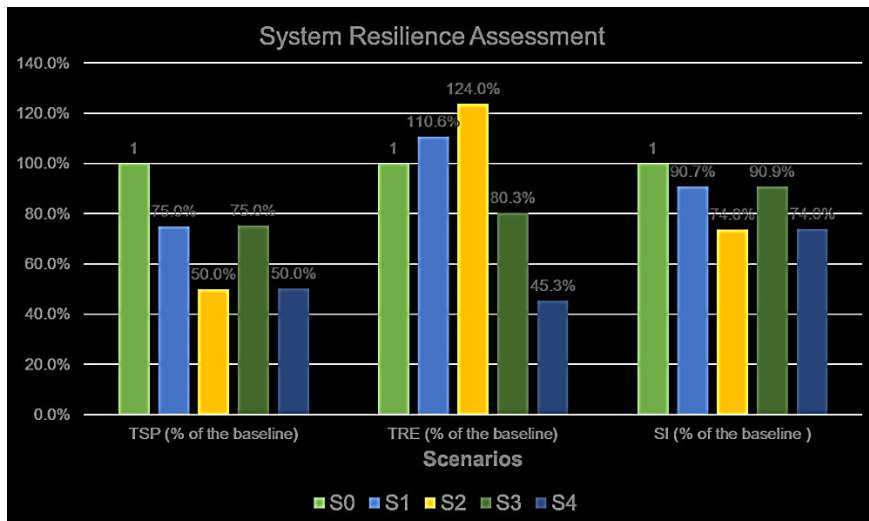


図 18 各規制措置下システムレジリエンス評価

2-2-5. 相互依存性解析

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。また、各シミュレーションモジュールが完成した際にそれらを統合するフレームワークが必要となる。そこで本課題では、「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、これらの中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モデルフレームワークの構築を行った。これによってライフラインのみに着目した従来の相互依存性モデルではうまく分類しきれない複合的な相互依存性の分類が可能となった（表 4）。提案する大都市の複合的相互依存性モデルの概念図を図 19 に示す。

プロジェクト前半は、主に、各シミュレータの統合プラットフォームとシミュレーションのテストベッドを兼ねた都市の簡易仮想モデルを開発、実装した。モデル開発では二つのモデリング手法を採用（各種ライフラインインフラに対してはネットワークモデルを、サービス・経済活動および市民生活に対してはエージェントベースモデルを適用）した。実装の詳細は以下の通り。

ネットワークモデル：各ライフラインネットワークを格子ネットワークで表現した。リンクは電気や水といったリソースを供給する導線や導管、移動機能を提供する道路や線路、あるいは、通信機能を提供する電話線や通信ケーブルを表し、ノードは各種インフラの機能を提供する施設を配置する場所を表す。後述する復旧シミュレーションのために実装したライフラインインフラは、電気、都市ガス、プロパンガス、上水道、下水道、廃棄物処理、尿尿処理、道路、鉄道、携帯電話、固定電話、PC 通信の 12 種類である。

エージェントモデル：企業・ライフライン・サービスエージェント、市民エージェント、インフラ復旧エージェントの 3 種類のエージェントを実装した。エージェントは I-P-O フレームワークを基に実装されている。企業・ライフライン・サービスエージェントは、企業、組織、労働者、タスクから定義される。企業は組織で構成され、組織ではタスクが実施される。労働者は自宅から企業へ移動し、その企業が提供するサービス・経済活動に関するタスクを行う。エージェントの内部構造や他エージェントとの繋がりには PCANS モデルをベースにエージェントの構成要素の関連性によって定義されている。市民エージェントには住宅、世帯、住民から構成される。各市民エージェントは生活行動として「冷暖房」、「ラジオ・テレビ」、「冷蔵庫」、「掃除機」、「洗濯」、といった生活基本行動を行う。また住民ごとにどの生活行動を重視するか設定できる。復旧エー

エージェントは復旧班とその要員から構成され、破壊されたライフラインインフラのリンクを修復する。ここでは、復旧要員参集率、復旧資材確保率、現場通信確保率を考慮してある。エージェントモデルの例として企業・ライフライン・サービスエージェントの概念図を図 20 に示す。

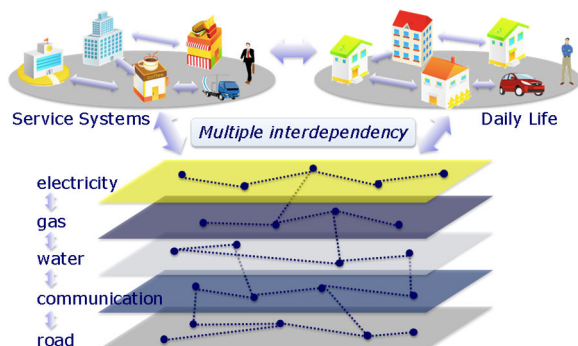


図 19 複合的相互依存性モデル

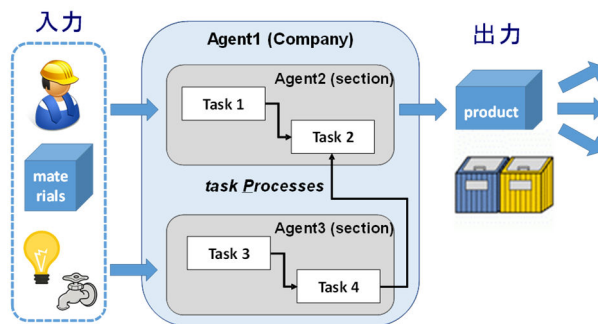


図 20 ライフライン・サービスエージェントモデル

表 4 複合的相互依存性の分類

	生活	企業・サービス活動	ライフライン機能
生活	①生活活動間の依存性 ・ リソース競合/分配 ・ 地理的依存性	②生活のサービス依存性 ・ 供給依存性 ・ 地理的依存性	③生活のライフライン依存性 ・ 供給依存性 ・ 地理的依存性
企業・サービス活動	④サービスの生活依存性 ・ 需要依存性 ・ (労働力)供給依存性 ・ 地理的依存性	⑤サービス間の依存性 ・ 供給依存性 ・ 需要依存性 ・ (代替性) ・ 地理的依存性	⑥サービスのライフライン依存性 ・ 供給依存性 ・ 地理的依存性
ライフライン機能	⑦ライフラインの生活依存性 ・ 需要依存性 ・ (労働力)供給依存性 ・ 地理的依存性	⑧ライフラインのサービス依存性 ・ (需要依存性) ・ 供給依存性 ・ 地理的依存性	⑨ライフライン間の依存性 ・ 供給依存性 ・ 需要依存性 ・ (代替性) ・ 地理的依存性

シミュレーションは次の順に進む。まず、ライフラインネットワークに想定被害を設定する。次に、ライフライン修復プロセスを遺伝的アルゴリズム等を用いて最適化、作成し、作成した修復計画のもとでライフライン、サービス・経済活動、市民生活のそれぞれの復旧過程をシミュレーション、復旧曲線を求める。そこからレジリエンスの三角形を算出し社会全体のレジリエンスを定量化・評価する。

プロジェクト前半では、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 (Verification) と GA 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った。基本検証では、R4 と呼ばれる一般的にレジリエンス向上に寄与するとされる影響因子 (Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity) の観点から、これらの影響因子に相当するモデルパラメータ (それぞれ、初期被害量、備蓄量、復旧計画の質、GA の世代数、復旧エージェントの能力) を変化させた際のレジリエンスの三角形の面積を評価 (感度解析) し、R4 に比例することでシミュレーションモデルの実装が妥当であるかどうかを確かめた。図 21 に感度分析結果を示す。また、図 22 はサービスの復旧過程を、左図は住民の生活充足度の回復過程をプロットしたものである。青色のグラフは最適復旧計画を策定する際にインフラの復旧速度のみを考慮した場合を、赤色はサービス達成度や生活充足度も考慮した人間中心視点での回復過程を表している。い

れの場合も、赤色で示された人間中心視点を考慮した復旧が早く、レジリエンスの三角形も小さいことが確認された。以上から、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が示唆された。

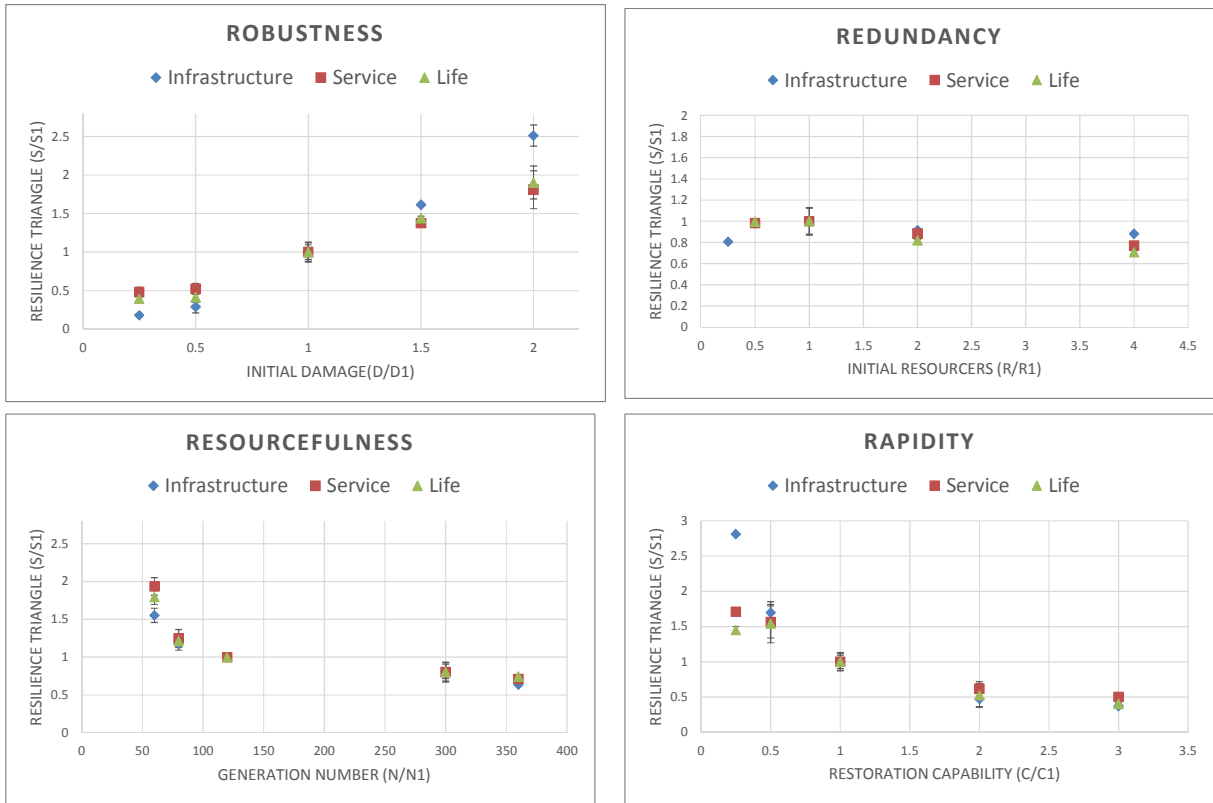


図 21 R4 に対する感度解析

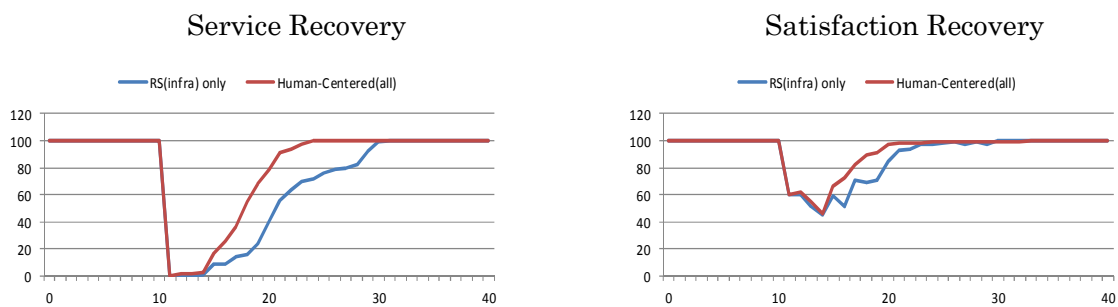


図 22 目的関数の違いによるレジリエンス評価

H27 年度では、前年度までに開発した簡易シミュレーションを実都市を対象に実施するために必要な基礎技術開発に取り組んだ。具体的にはオープンデータから東京 23 区のモデルの構築・構築法の開発を行った。まず、ラインラインシステムに関して、道路、上下水道、電気、鉄道、都市ガス、プロパンガス、廃棄物処理、し尿処理、携帯・固定電話・PC 通信の各ライフラインインフラのネットワーク形状、施設の位置に関するオープンデータを収集し、ラインラインインフラシステムの格子ネットワークへの（近似）マッピングを行った。格子ネットワークを実際の地図（第 3 次メッシュコード）上にマッピングすることによって、実際の地理的情報を考慮したモデリングが可能となる。格子サイズは 30×30 の格子とした。施設は位置の緯度経度に対応する最も近いノードに配置する。ネットワークの形状はネットワークがメッシュを跨ぐ際にその両

端のノードにリンクを作成することで近似した。次に、産業・サービスシステムにおける企業エージェントの数・位置および市民エージェントの数・位置の設定を行った。具体的には、平成 22 年度の国勢調査データから東京 23 区各区の就労者人口データを使って企業数を設定し、また区ごとの夜間人口データを用いて市民エージェントの数を設定した。区ごとに割出したエージェント数をメッシュに均等に配分することで各エージェントの地理的分布を設定した。また、被災予測に関するオープンデータから被害設定を作成する方法の開発を行った。首都直下地震を例題とし、内閣府南海トラフの巨大地震モデルの検討会が作成した震度分布・浸水域等に関する被害予想データのうち東京都南部を震源とする地震被害予想値を用いて、各ライフラインインフラへの被害設定（シミュレーションへの初期入力データ）を作成した。被害予想データは 3 次メッシュコードを用いて地理情報と震度情報がまとめられているため、メッシュコードに対応するノードにそのメッシュコードの予測震度を割当て、2 ノードを繋ぐリンクには両端の平均震度を割当てた。この震度に比例する被害量を設定した。最後に、最適復旧計画作成における GA の目的関数の収束状況やライフラインインフラの復旧カーブの様から、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。



図 23 東京 23 区を想定した復旧カーブ

H28 年度では、東京 23 区モデルを用いた複数の災害シナリオのシミュレーションの実施、及び、簡易モデルを用いた What-if シミュレーションを行った。東京 23 区モデルによるシミュレーション結果を図 23 に示す。ベースライン条件は東京湾を震源とする首都直下地震の震度予測に基づいた被害を各ライフラインに設定したもの、湾岸被害大条件はベースラインに湾岸エリアの被害を追加上乗せしたもの、パンデミック条件はベースライン条件下で感染症が発生し労働力の供給が減少した場合の設定である。

様々な条件下でのシミュレーション結果から、1) ライフライン、企業活動、市民生活の相互依存性考慮によって最適修復プロセスは異なること。2) ライフライン、企業活動、市民生活の重要度設定によって最適修復プロセスは異なること、3) ハードウェア設計だけでなくソフトウェア（企業・市民エージェントの行動ルール）設計によってもレジリエンスは向上しうることが分かり、人間中心の都市のレジリエンス評価、都市システム設計が必要であることが示された。

2-2-6. 災害コンテキスト

危機対応におけるインフラ事業者や行政などの意思決定を支援する手段として、起こりうる様々な災害シナリオを可能な限り網羅するシナリオライブラリの構築を行った。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。まず、災害看護のコンテキストを例題にシナリオの核となる災害コンテキストのモデル化を試みた。まず、過去の災害訓練シナリオや災害事例、災害体験の手記などを定性的に分析、検討し、災害コンテキストを構成する重要要素として、「災害状況」、「タスク」、「制約」の3つを抽出した。ここでいう災害状況とは、災害下における物や人の状態や様相を記述したものの集合を、タスクとは、災害状況下においてなんらかの目的を達成するために行う行動や一連の行動のことを指す。また、制約とは、タスクの達成や遂行の障害となるものを指し、ある災害状況下においてあるタスクを遂行しようとした際に発現する。よって、災害状況とタスクとの関連によって定義される。さらに、抽出した3要素のうち「災害状況」と「タスク」に関して、それらを詳細に記述するための要素モデル設定し、それに基づく拡張を行った。「災害状況」に対してはサービス工学の分野で提案されたサービスコンテキストモデルを用いた拡張を行った。「タスク」に関しては、災害医療・看護のタスクを包括する CSCATTT (Command, Safety, Communication, Assessment, Triage, Treatment, and Transportation) と呼ばれるフレームワークを用いて拡張を行った。これらの要素モデルは対象によって適切な既存モデルを選択すればよい。構築したコンテキストモデルの概要を図24に示す。右図はモデルの概念図を左図は具体的に仮想コンテキストを再構成した際の出カイメージを表している。図に示すように災害コンテキストをパーツごとに分けて整理、データベース化することによって、仮想的な災害コンテキストの再構成が容易になる。

次に、構築したそれぞれの要素モデルをデータモデルとし、要素抽出の際に用いた資料に含まれる災害状況、タスク、制約を記述、蓄積することによって簡易の災害コンテキストデータベースを構築した。このデータベースはシナリオライブラリ構築のためのシナリオのパーツを格納したものである。具体的には以下のように行った。

- 「災害状況」：対象とする病院の詳細情報（病院敷地、建物、病棟、フロア、部屋、設備などとそれらの詳細情報）を開発した災害状況モデルに従ってXMLファイルに記述した。
- 「タスク」：実際の訓練で想定されている災害時の対応タスクを訓練シナリオから抽出し、開発したタスクモデルに従って記述した。
- 「制約」：タスクを実行する上で生じる問題を、「制約」と「障害」に分類した。「制約」とはタスクを実行する際に必要となるリソースが不足・利用不可になることで生じる問題。「障害」とは物理的な被害によってタスク実行が困難となるものを表す。前者はタスク実行の前提条件から列挙、整理した。後者は災害状況の構成物の被害状況をもとに列挙、整理した。

最後に、構築したデータベース内のデータを組み合わせることによって半自動的に仮想のコンテキストを作成するソフトウェアプロトタイプの開発を行った。ユーザーが必要最小限の災害状況パラメータ（例えば、対象となる病院の情報など）とそこで行うタスクを選択すると、ソフトウェアは残りの災害状況パラメータを自動的（ランダム）に設定し、作成された仮想状況とタスクの関連から起こりうる制約を制約データベースから検索し提示する。また、作成された仮想コンテキストを文章で出力する機能の開発も行った。開発に当たっては、災害看護を専門とする看

護士にデモ、ヒアリングを行うことで、モデルの網羅性や完全性の評価、開発したプロトタイプ
の有用性評価を行うとともに今後の開発に対するフィードバックを得た。ソフトウェアが自動生
成した災害コンテキスト例（一部）を図 25 に示す。左図上部はタスクフロー、下部は対象病院の
基本情報を、右図は状況変化をそれぞれ表している。

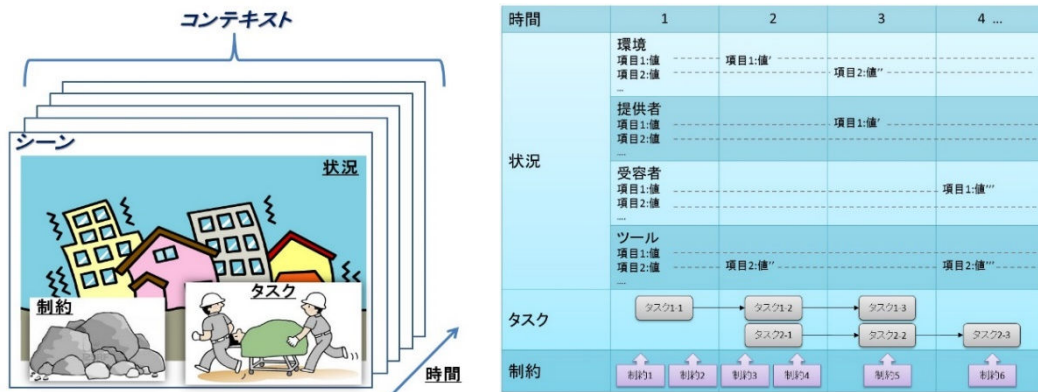


図 24 コンテキストモデルの概念図

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
状況依存タスク	1	2	3	4	5	6	7	8	
状況依存タスク	1	2	3	4	5	6	7	8	
タスク	1	2	3	4	5	6	7	8	
制約	1	2	3	4	5	6	7	8	

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
避難所1	収容人数	163							
避難所2	収容人数	445							
避難所3	収容人数	61							
避難所4	収容人数	216							
避難所5	収容人数	435							
被害想定	被害タイプ	SUBDUCTION_ZONE_EARTHQUAKE							
	震度	SIX_PLUS							
	津波	0							
	火災	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	水害	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP
	下水道	STOP	NO_DAMAGE						
	電気	STOP	STOP	PARTLY	PARTLY	NO_DAMAGE			
	ガス	UNAVAILABLE	UNAVAILABLE	PARTLY	PARTLY	UNAVAILABLE			
	道路1	CONNECT	CONNECT	STOP	STOP	CONNECT	CONNECT	STOP	STOP
	道路2	STOP	GO	STOP	GO	CONNECT	GO	STOP	STOP
	道路3	GO	CONNECT	GO	STOP	GO	GO	GO	GO
	道路4	CONNECT	GO	GO	GO	GO	GO	STOP	CONNECT
	道路5	CONNECT	CONNECT	GO	STOP	STOP	CONNECT	CONNECT	STOP
	道路6	STOP	STOP	CONNECT	GO	CONNECT	CONNECT	CONNECT	GO
	道路7	CONNECT	GO	GO	STOP	STOP	CONNECT	CONNECT	STOP
	道路8	STOP	STOP	GO	CONNECT	GO	CONNECT	CONNECT	CONNECT
	道路9	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	CONNECT	STOP
	道路10	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP
	道路11	GO	CONNECT	CONNECT	CONNECT	GO	CONNECT	CONNECT	GO
	道路12	GO	CONNECT	CONNECT	CONNECT	STOP	CONNECT	GO	GO
	道路13	GO	GO	GO	CONNECT	GO	CONNECT	CONNECT	GO
	道路14	CONNECT	GO	GO	CONNECT	STOP	STOP	STOP	STOP
	道路15	CONNECT	GO	GO	CONNECT	GO	GO	GO	GO
	道路16	STOP	CONNECT	GO	CONNECT	GO	CONNECT	CONNECT	STOP
	道路17	CONNECT	STOP	CONNECT	STOP	STOP	STOP	STOP	CONNECT
	道路18	GO	GO	STOP	STOP	GO	CONNECT	CONNECT	STOP
	道路19	STOP	CONNECT	STOP	STOP	CONNECT	CONNECT	STOP	STOP
	道路20	STOP	STOP	GO	STOP	STOP	STOP	STOP	GO
病院	入院患者数	2							
	外来患者数	21							
	外傷	CRACK							
	浸水	YES							

図 25 コンテキストモデルの記述例（一部）

一方、本コンテキストモデルを用いて災害状況を詳細に記述するよりもむしろ、複合的相互依
存性を考慮した都市の復旧過程シミュレーションの前提となる災害シナリオを記述することが、
プロジェクトの全体目標からより必要であることから、シミュレーションの入力となる初期被害
データの基になる定性的、Narrative なシナリオをワークショップ等で作成する方針がより適切
であることを確認し、平成 28 年度は数回のワークショップを開催しシナリオ作成を行った。

2-2-7. リアクティブな意思決定による復旧計画

インフラの損害に関する完全で正確な情報が入手可能な場合に、復旧計画は様々な目的関数に
基づく何らかの最適化手法を用いて作成することができる。しかし、被災情報が不完全であつた
り不正確だったりした場合、新しい情報が到着するたびに最適化をやりなおして再計画する必要
が生じてくる。そこで、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。

インフラ復旧計画の予備的な試みとして、まず震災など大規模災害後の災害地域とその周辺に
おける短期の重要物資の再配置を行うための手法を開発した。すなわち、コンピュータ上に道路

網で結合された多数の都市から成る被災地域の仮想的なモデルを構築した。そして、入手し得た被災都市からの情報に基づいて優先順位付けを行い、非被災都市から被災都市への重要物資の輸送計画を逐次策定する。これを各都市独立に、あるいはある程度の情報集約の下に繰り返す。このようなトリアージ原則に基づく物資輸送計画の様々な特性をシミュレーションにより明らかにした。その結果、開発手法は準最適な解を与えるばかりでなく、情報の欠落・遅延・不確かさなど、現実的な状況にも頑健に対応可能であり、線形計画法などに基づく従来手法より優れた手法であることが示された。

図 26 は福島県の現実的なモデルに対して、太平洋岸に近いいわき、南相馬、田村の 3 都市が被災したと仮定したシナリオで物資再配置を実施した例である。曲線①がいわき、②が南相馬、③が田村の物資量の回復曲線である。いわき市の人口規模が大きいために、初期には同市を対象とする再配置が優先されるが、計画の最適化が図られて再配置は 3 市ともほとんど同時に終了することがわかる。

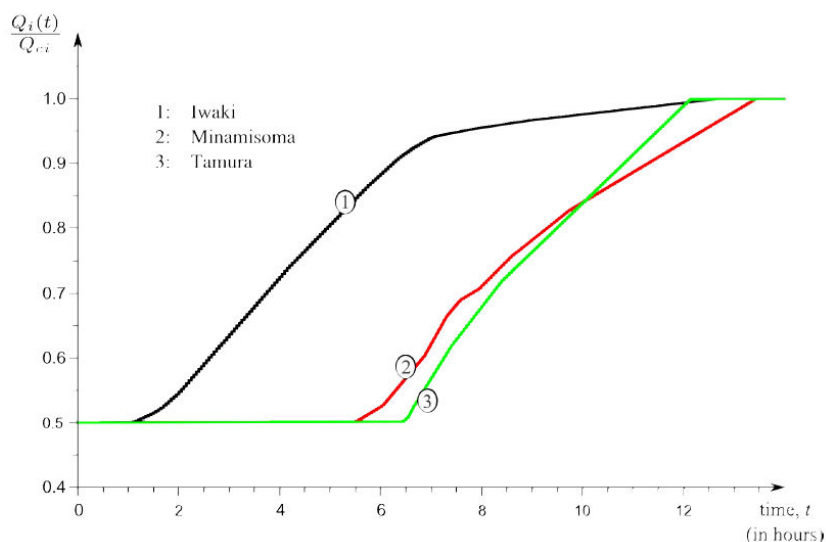


図 26 福島県をモデルとした物資再配置のデモ結果

この手法をインフラの復旧計画マネジメントに応用し、一切の推測を用いずに現状入手可能な情報に基づいてその時点で最も優先順位の高い対象に復旧資源を割当ててリアクティブな復旧計画法を開発した。復旧チームの責任者はインフラの破損情報と復旧チームの能力情報を参考に、どの破損箇所を修復するかを逐次的に決定する。ここで、破損箇所はインフラネットワークのリンクとし、健全、破損、不明の 3 つの状態をとるものとする。復旧チーム責任者は破損箇所の優先順位を社会的あるいは経済的配慮に基づいて決定し、最も優先順位の高いリンクに復旧リソースを割当て、この操作を復旧リソースが無くなるまで繰り返す。これは、「緊急性を要するものから先に」と言うトリアージ原則に基づく意思決定法である。新たな情報が得られたらそれを加味しながら、これを一定時間ごとに繰り返す。

検証用テスト例題として、複合インフラ全体モデルの簡易テスト例題と同規模の、6×6 の仮想矩形格子上に 9 種のインフラを配置し、インフラごとに 6 復旧チームが使えると想定し、時間管理の間隔は 1 時間と 1 日ごとの管理を組合せた。被災シナリオとしては、インフラ 9 種で全 540 リンクのうちの 324 リンクがさまざまなレベルで損害を受けると仮定した。

提案手法をテスト例題に適用することにより、まず完全情報下での計画能力を確認した。その結果、本手法によって対象地域全体におけるマクロな復旧計画ばかりでなく、個々のインフラのミクロな復旧計画も適切に作成できることが確認できた。一例として、図 27 は瓦礫撤去（道路）

と下水道の機能回復曲線を比較したものである。瓦礫撤去は復旧チームの移動を左右するので、他のインフラの復旧に先行して実施されなければならないところ、適切な優先順位の基準を用いることによってこれが自然に実現されていることがわかる。

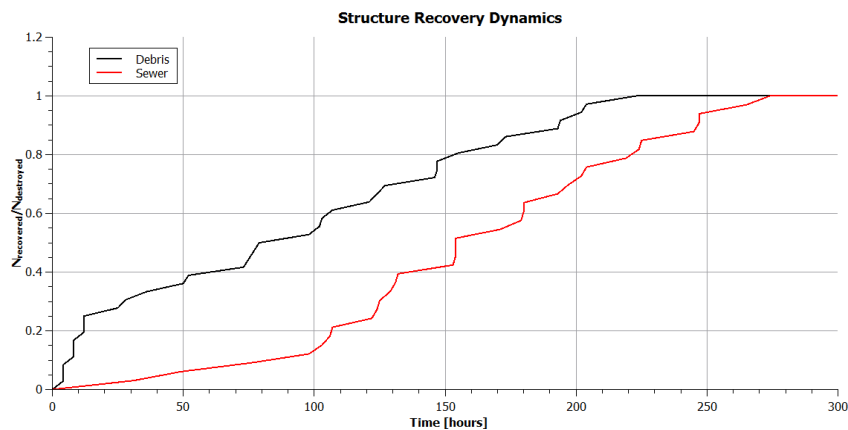


図 27 瓦礫撤去と下水道の機能回復曲線の比較

つぎに、不完全情報下における計画能力を検証するため、最初は各インフラの破損情報のうちの 1/3 を不明として、一定時間の経過後になって入手可能となるシナリオでシミュレーションを行った。完全情報が入手できる時間は、発災から 72 時間、120 時間、168 時間、216 時間後と変化させた。

シミュレーション結果を図 28 に示す。完全情報の到着が遅れるに従って、復旧完了も最初から完全情報が入手できた場合に比較して遅れるが、72 時間遅れのケースでは最初から完全情報が得られる標準ケースとほぼ同じタイミングで復旧が完了している。しかし、これよりも情報入手が遅れる 3 ケースでは、復旧完了が標準ケースよりも遅れるが、遅れ時間は情報の入手遅れ時間よりも短い。たとえば、完全情報が 216 時間遅れる最悪のケースにおいて完全情報が入手できてから復旧作業に入った場合、復旧は当然 216 時間遅れるが、提案手法では標準ケースより 146 時間しか遅れておらず、70 時間の節約になっている。これは、当面破損がわかっている個所から復旧を始めると言う臨機応変な意思決定のメリットが現れたものである。このように、リアクティブな意思決定は不完全情報下においてもロバストな復旧計画に有効であることが示された。

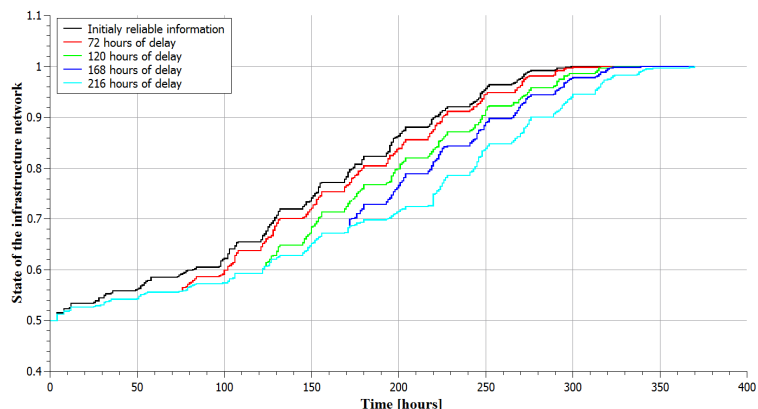


図 28 不完全情報下における機能回復曲線

1-2-8. 危機管理政策議論のレジリエンス分析

(1) 撤回可能ゴール構造表記法を搭載した議論分析システムの開発

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。利害関係者の合意形成手段、責任者の説明責任遂行手段、国際規格への準拠手段として、特定の環境下での特定のシステムの安全を示す説得材料一式、およびその取り組みであるアシュアランスケースが注目されている。アシュアランスケースの記法には、主張とそれを支える理由、理由を裏付ける証拠を木構造で表現するゴール構造表記法がある。本サブテーマでは、政策が機能する前提や政策の効果を分析し、それらの関係を論理的に記述するためにゴール構造表記法を用いる。しかし、アシュアランスケースの取り組み一般に言える弊害に、自身の信念を強化する証拠を集める人間の傾向と定義される確証バイアスがある。そこで本研究では確証バイアスを回避するために主張や理由に対する反証の記述を許容するようにゴール構造表記法を拡張した。

ゴール構造表記法の拡張版である撤回可能ゴール構造表記法では、主張に賛成する立証と反対する反証が混在する。従って、結論の主張が信じるに値するかを判断するための客観的基準が必要となる。そこで、人工知能の領域で研究されている議論学の知見を用いて結論の主張の妥当性を評価する基準を与える。政策分析におけるこの意図は、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評価することである。

撤回可能ゴール構造表記法に従い議論を構築するとき、それは一般に多数の立証と反証からなる。そこで、撤回可能ゴール構造表記法およびその意味論を定義し、それらを議論分析システムに搭載した。ゴール構造表記法の議論分析システムである Astah GSN の拡張機能としてこれらを実現した。図 29 は議論分析システムを用いて記述および評価した議論の例である。四角（図では Goal）のノードは主張（図では<<presumption>>）または例外（図では<<except>>）を表し、平行四辺形（図では Strategy）のノードは上位の主張を立証（図では<<pro>>）または反証（図では<<con>>）する戦略を表す。楕円（図では Context）のノードは補足情報を表し、円（図では Solution）のノードは上位の主張の証拠（図では<<pro>>）または反対証拠（図では<<con>>）を表す。緑色（赤色）のノードは意味論によって受理可能（受理不能）であると機械的に評価された主張および戦略を表す。

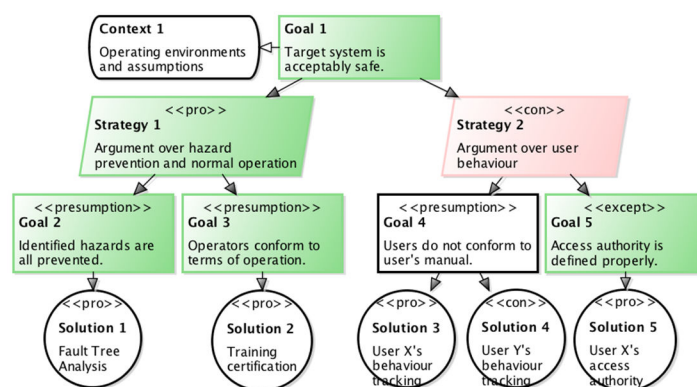


図 29 撤回可能ゴール構造表記法の例

(2) 危機管理政策議論の事例分析

(1)で開発した議論分析システムを用いて、現実に行われた「国土強靱化アクションプラン 2014」 「政府の危機管理組織の在り方について（最終報告）」の資料を分析した。

任意の政策は新しいリスクを生み、それへの政策があるものはないものよりも頑健である。例

えば、情報の多元的収集は事態の多面的把握という効果をもたらす一方で、緊急に対応すべき事態への遅れという負の側面がある。専門家を交えてこの負の側面に対する対策が講じられていることを分析し、政策の頑健性を評価する。さらに、政策決定の過程では利害関係者間の争点や合意点の分析、個々の利害関係者の矛盾点の分析が求められる。これらを実現する基礎理論として、議論に基づく教師あり受理可能性学習を定式化した。

まず「国土強靱化アクションプラン 2014」を取り上げ、そこで掲げられている政策の論理とそれらの政策が持つリスクの論理を抽出した。作成した議論のノードの総数は 170 個であり、結論の主張は「大規模自然災害発生直後から救助・救急、医療活動等が迅速に行われる」である。図 30 は構築した議論の部分議論である。緑枠の中は「国土強靱化アクションプラン 2014」からの抜粋であり、赤枠の中は専門家を含む分析者によって指摘されたリスクである。最上位の緑枠で標準化が議論され、それに対する反論として赤枠で周知徹底および臨機応変さが議論されている。周知徹底に対する反反論として緑枠で訓練実施が議論されている。

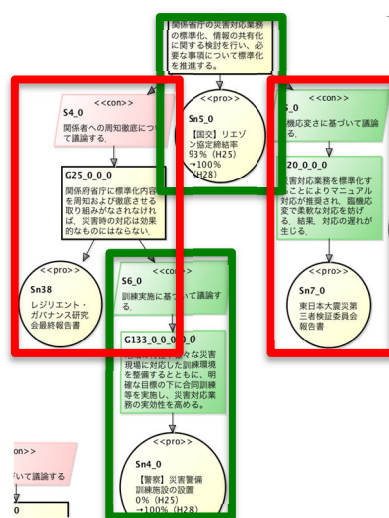


図 30 構築された部分議論

分析の結果、「国土強靱化アクションプラン 2014」で掲げられる 35 個の政策のうち 6 個については重要業績目標が未設定であることが判明した。また 16 個は反論が生じていないまたは反論に耐えうる政策であり、5 個はリスクを軽減するための政策であることがわかった。政策が副作用としてリスクを生み、それを別の政策が軽減するという構造に着目し、議論分析システムで分析することで、議論の妥当性を脅かす脅威シナリオの創出につながるという重要な知見を得た。

撤回可能ゴール構造表記法を用いて、「政府の危機管理組織の在り方について（最終報告）」についての議論の論理構造を可視化した。論理構造に現れる命題の例外や提案の副作用など指摘を危機管理政策の専門家に依頼し、議論の補足を行った。図 31 は撤回可能ゴール構造表記法を用いて可視化した議論の論理構造である。赤枠内は専門家によって補足された部分である。

図 31 の木構造の根にある命題「政府における統一的な危機管理対応官庁の創設等中央省庁レベルでの抜本的な組織体制の見直しを行なうべき積極的な必要性は、直ちには見出しがたい。」に関する頑健性、冗長性、臨機応変性、迅速性の値は専門家の補足前後でそれぞれ 0→0、14→0、10→10、34→62 と変化した。元々の議論が十分ならば専門家の介入は値をさほど変化させないはずである。しかし冗長性は低下した。これは元々の議論において立証したい命題を支持する代替案についての検討が不十分であることを意味する。専門家の介入は頑健性を変化させなかったが、頑健性の弱い箇所への専門家による反証があったことから、より時間をかけた分析は頑健性に

化をもたらす可能性が示唆された。

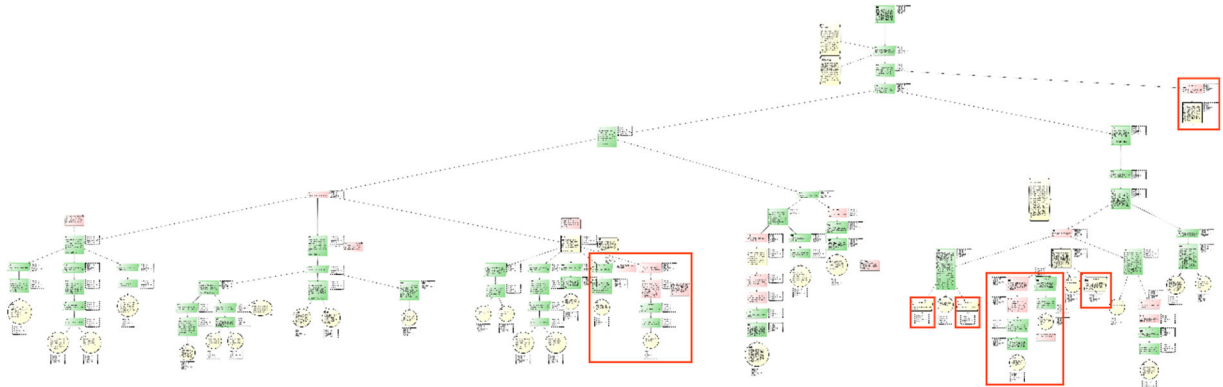


図 31 政府の危機管理組織の在り方についての議論の論理構造

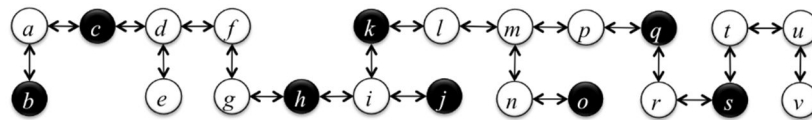


図 32 議論構造と被験者から取得した受理可能性（賛否）の意見

最後に、図 32 に示す 22 個の論証からなる議論を 29 名の被験者に見せ、各被験者から各論証に対する賛否をアンケート調査で得た。図 3 は取得した議論構造とある被験者の意見である。

一つ抜き交差検定法で精度 (accuracy) 76.22% (図 33 参照)、AUC (area under ROC curve) 0.74 (図 34 参照) の中程度 (fair) の結果を得た。図 33 において実線はテストデータにおける精度、点線は訓練データにおける精度を表す。図 33、34 において太線は議論に基づく受理可能性学習の結果、細線はベースライン (論証の発言者の観点から分類) の結果を表す。これらの結果より、議論に基づく教師あり受理可能性学習は実際の危機管理政策議論の分析において有効であるということを示した。

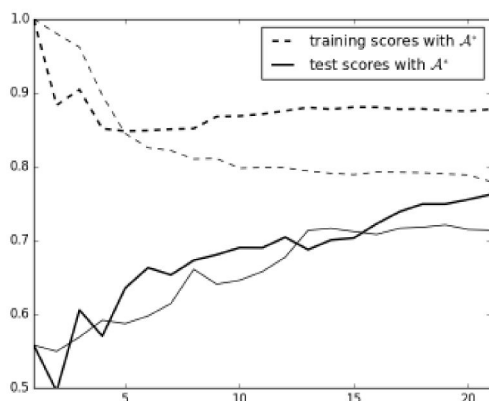


図 33 学習曲線
(横軸は訓練例数、縦軸は精度)

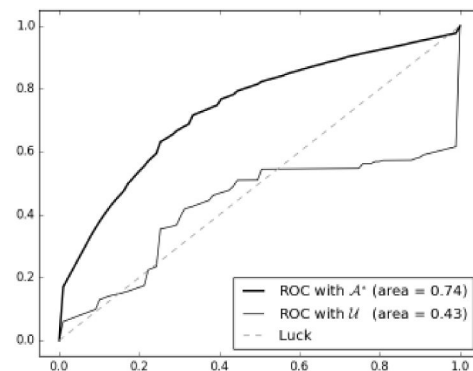


図 34 ROC 曲線
(横軸は偽陽性率、縦軸は真陽性率)

2-2-9. 市民社会・社会活動の安全に係る政策・制度の選択肢研究

(1) 緊急処理事態に係る法制度の現状分析と課題の構造化

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について、米国や欧州諸国の制度との比較を行い、課題の構造化を行った。平成 25 年度に成立した国土強靱化基本法、政策大綱および首都直下地震対策特別措置法などに係る政府機関および地方自治体の動向を継続的に調査した。

(2) 政府等の危機管理機能の現状分析と課題

政策ビジョン研究センター内に「レジリエンス政策研究会」を設置し、定期的に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うとともに、文献調査した米国の NIMS、ICS 等の危機管理機能の運用実務面での課題等について米国国土安全保障省・緊急事態管理庁、大学へのヒアリング調査を行った。また、英国の緊急事態対処の組織制度について文献調査及びヒアリング調査を行った。

(3) 重要インフラ防護・レジリエンス強化のための政策・制度設計

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った。訪問調査の対象は、米国の連邦危機管理庁（FEMA）、農務省食品安全検査局（USDA-FSIS）／食品医薬品庁（FDA）、国土安全保障省（USDHS）、ジョージワシントン大学 ICDRM、英国の内閣府（Cabinet Office）、ロンドン消防局内ロンドン・レジリエンス・チーム、英国王立協会、オックスフォード大学などである。

3. 研究開発成果

3-1. 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

- ・ 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

(2) 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

(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

- ・ 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

3-2. 各成果の詳細

3-2-1. 災害リスクを考慮した関東圏のエネルギー需給分析

本研究では、関東圏の電力・石油インフラのネットワーク構造、電力・石油部門間の相互依存性、ならびに大規模地震の発生リスクを明示的に考慮した関東圏のエネルギー需給モデルを構築した。正常状態および災害発生状態における電力システム、石油供給・流通システムのコストを線形計画モデルで算出し、それらを確率動的計画モデルで考慮することにより、大規模地震の発生リスクを考慮した関東圏のエネルギーシステムの最適運用パターン等を分析できるようになっており、政策担当者や事業者の意思決定ツールの一つとして活用できると考えられる。

構築したモデルを利用して、関東圏の現状の電力・石油インフラが抱える大地震に対する脆弱性を評価した。電力システムの脆弱性として、東京湾沿岸に発電設備の立地が集中しており、電力供給の冗長性が確保されていない点が挙げられる。分析の結果、災害時の電力供給力不足を補填するため、東北地方・西日本からの電力の地域間融通、および非常用電源の利用が図られるが、前者は地域間連系線の送電容量のボトルネック、後者は燃料備蓄量の不足と石油インフラ被災による調達力の低下が原因となり、電力部門の災害対応能力に制約がかかる結果となった。また、関東圏の電力システムのレジリエンスを高める施策として、日本海側および茨城県沖に対するガス複合火力の新設が、その建設コストと比較しても、高い経済性を有する結果が得られた。この結果は、関東圏の電力システムにおいて、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ことを示唆している。一方、西日本の電力緊急融通を行うための周波数変換設備の増強は、建設コストと比較すると経済合理性はそれほど高くない可能性が示唆された。

また石油需給に関しては、災害時の非常用電源および石油火力の出力増加に伴う A 重油・C 重油の需要の高まりを踏まえ、他の油種の生産量が低下する一方、重油は平常時を上回る水準で生産が行われた。しかし、災害時の非常用電源および石油火力用の燃料需要に対して、関東圏以外の製油所からの燃料輸送制約、関東圏の製油所や油槽所の毀損や道路混雑により燃料の供給力不足が発生し、重要インフラ間の相互依存性を通じて、電力の供給力不足が発生する可能性が示唆された。また石油の需要サイドでは、製油所や油槽所の機能停止により、東京湾岸の周辺地域で石油の大幅な需要抑制が必要となる可能性が示唆された。

最後に、関東圏の電力・石油市場の脆弱性を踏まえ、災害時の原子力発電所稼働、非常用電源の燃料備蓄増強、油槽所の出荷機能強化、道路交通流の円滑化などの対策が、関東圏の災害時の停電影響等も含めたエネルギーシステムコストへ与える影響を分析した。その結果、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、災害リスクを考慮した期待コストを大幅に削減する可能性が示唆された。

本研究の大きな成果として、政策担当者や事業者に対して、上記に述べた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を構築した点が挙げられる。今後は、関東圏のみならず全国のエネルギーインフラや、南海トラフ巨大地震等の災害を対象にした全国大での分析を実施する予定である。

3-2-2. 交通・物流ネットワーク

本プロジェクトで整備した交通流シミュレータを用いて、東京 23 区内の輸送基地と輸送拠点間の緊急支援物資輸送に要する時間を求めた。図 35 (左) に、道路・輸送基地に全く被害がない場合の輸送時間と各輸送拠点が依存する輸送基地を再掲する。一方で、津波や沿岸火災等によって海岸・河川に接する輸送基地が使用不能になったシナリオを想定した場合の評価結果を図 35 (右) に示す。前掲の図と同じく、白丸で示される地点が輸送基地であり、色付きの丸で示される点が輸送拠点である。輸送拠点の色およびカラーバーは輸送時間 (単位: 分) を意味する。また各輸

送拠点に対して最小輸送時間を達成した輸送基地を線で結んでいる。

図から、仮に沿岸の輸送基地がすべて使えなくなった場合には、内陸の限られた輸送基地に強く依存すること、またその輸送にはより多くの時間を要することが見て取れる。あわせて、交通流シミュレータを用いて道路被害率-移動時間の関係を地域ごとに求めた。得られた情報は、地域の防災計画担当者が今後の防災計画の立案・見直しを行う際の判断材料の1つとなるであろうと考える。

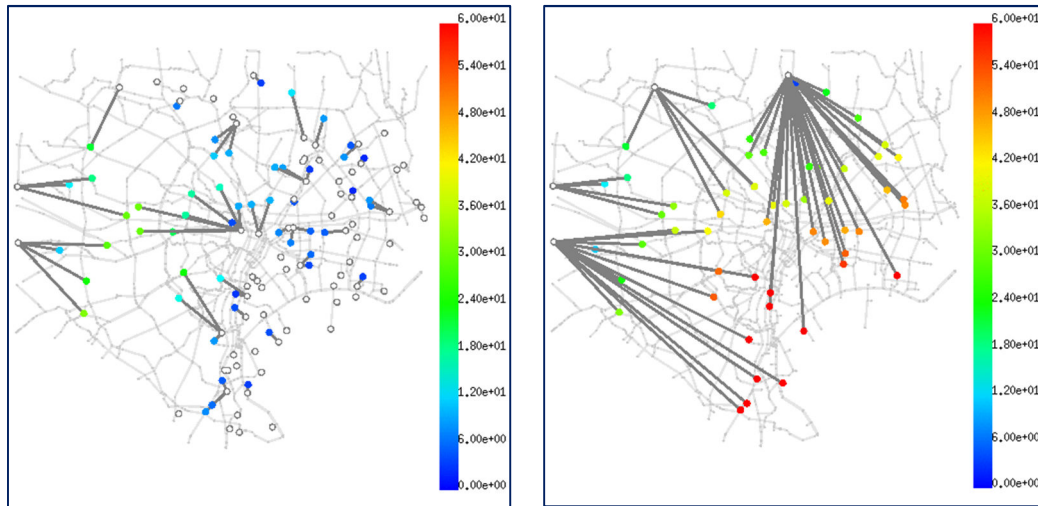


図 35 輸送基地・輸送拠点間の依存関係と輸送時間

(左：輸送基地に被害がない場合、右：沿岸の輸送基地に被害が出たことを想定した場合)

本プロジェクトでは道路被害率を画一的に用いたが、本来、道路被害は周辺の建築物の倒壊や火災、あるいは液状化などの影響を受け地域的に偏りが出るはずであり、今後詳細に検討する必要がある。また本研究期間においては災害直後の一般市民の移動需要の予測には踏み込まず公的な緊急支援物資輸送を重視することとしたが、将来的には市民の移動も推定し評価に組み込む必要が生じるであろう。

3-2-3. 上水道システムのレジリエンス分析

本プロジェクトで整備した上水道モデルとシミュレータを用いて、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た。被害予測においては東京都防災ホームページで公開されている「首都直下地震等による東京の被害想定」に従った予測モデルを導入した。これらの想定に基づく1/4地域メッシュ(約250m四方)での被害予測結果を図36に示す。なお、このときの耐震化率は21.8%とした。中央防災会議のデータを直接利用可能としたことにより、様々な震源に対する被害予測を容易に可能となった。また、被害予測結果として液状化危険度ランクが大きく寄与していることが分かった。

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。現在、2023年までに都内の耐震継手化率を57%まで上昇させることが進められている。このため、首都直下南部の地震動データに対して、液状化危険度ランクが高い地域を優先して50%まで耐震化した場合の被害状況の変化を調べた。耐震化率の進展と被害予測の変化の様子を図37に示す。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。

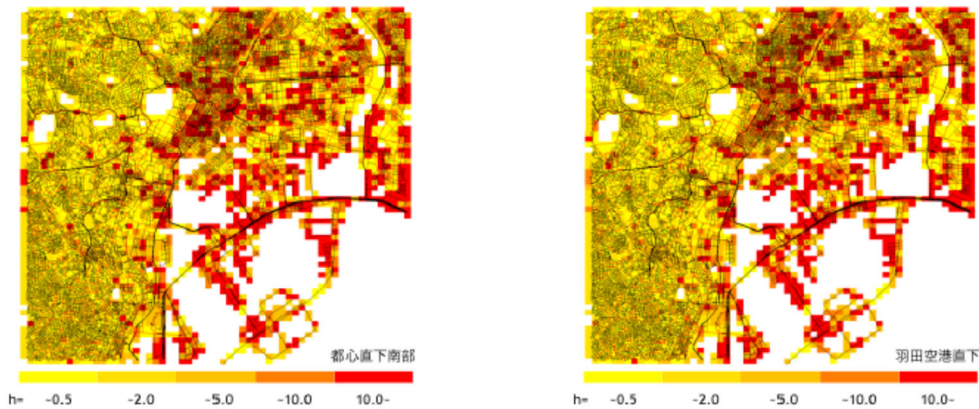


図 36 東京都区部主要地域の上水道網被害予測図
(左：都心直下南部、右：羽田空港直下)

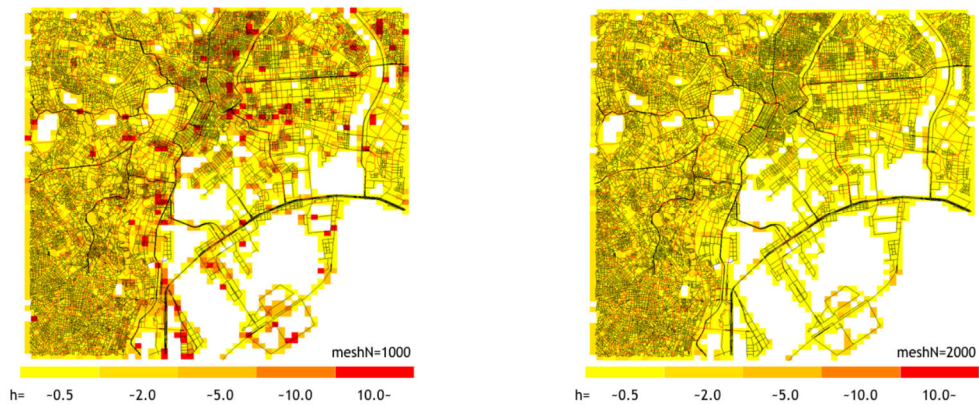


図 37 東京都区部主要地域の耐震化率の進展と被害予測（都心直下南部）
(左：耐震化率 32%、右：耐震化率 49.8%)

3-2-4. 固定電話ネットワークのレジリエンス分析

シミュレーション結果から、通信事業者が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。

まず、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。この差異は、地域間の回線数が実需に比例していないことを映し出している可能性がある。本結果は、均等でない計画の証拠を与えるものであり、各局のレジリエンスに関するさらなる調査が求められる。

さらに、本研究では、保留時間の制約が、少ないコストで呼損率を減少できることを示した。保留時間が制限されなければならなかった呼を補うためのコストは、回復作業（つまり、呼時間を制限しなければならない電気通信サービス利用者に対する不満の補償）の社会的コストとして解釈することができよう。しかしながら、このコストは情報損失としても解釈できるであろう。現在、主流である災害発生時の方針は呼量規制の実施である。本研究は、規制計画を実施するには、コスト（TRE）を考慮する必要があることを示唆している。本研究で開発したモデルにより呼損率、コストを計算することで固定電話ネットワークのパフォーマンスと回復（規制計画）

の評価を行うことができる。今後はこのモデルにモバイルネットワークやイントラネットネットワークの評価を行えるようになることが期待される。

3-2-5. 相互依存性解析

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の技術基盤となる都市システムの複合的相互依存性モデル、モデルに基づく都市システムのレジリエンス評価のためのシミュレーション、及びシミュレーション結果から示唆される知見が本プロジェクトの成果となる。

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。今後の展開としては、提案モデルによって大分類された 9 種類の相互依存関係の詳細モデルの開発、特にマネーフローなどの経済的相互依存性の考慮等が考えられる。

大都市システムのレジリエンス評価のためのシミュレーションによって、人の活動を考慮した人間中心の都市システムのレジリエンス評価が可能となった。様々な想定・仮説のもとでの都市システムのレジリエンス評価が可能である。また、本シミュレーションを用いることによって都市防災や危機管理に関する既存の政策の評価や、政策提言の際の定量的・客観的根拠を提供することが期待できる。今後の課題としては、実都市のシミュレーションモデル構築のためのデータ収集、あるいは収集できたデータ管理に関するセキュリティなどを解決する必要がある。また、シミュレーションの大規模化、高度化といった技術的課題も挙げられる。今後の展望として、レジリエンス評価にとどまらない様々な目的に利用可能な都市シミュレーションへの発展が期待できる。

本プロジェクトで実施した都市のレジリエンス評価シミュレーションによって、特に、人間中心のレジリエンス評価の必要・重要性を指摘できた点が大きな成果である。

3-2-6. 災害コンテキスト

プロジェクト前半では、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、仮想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。災害コンテキストモデル、ソフトウェア、及び専門家による評価結果がプロジェクト前半における成果である。支援ソフトウェアは災害拠点病院等の医療機関において災害訓練シナリオ設計に携わる人の支援を想定して開発したものであるが、方法論は様々な組織、個人に応用・適用可能である。コンテキストモデルの概念図および、ソフトウェアによる災害コンテキスト出力例は図 25 に示した。ソフトウェアに関して、災害看護を専門とする看護師 4 名に対して実現可能性と有用性の評価を行った。社会技術システムの定性評価手法を用いてソフトウェア利用による影響シナリオについて 10 段階評価（-5～+5）を行った（図 38）。図中の数字は各リンクに関する評価の平均値を示す。災害状況の理解や知見の蓄積・再利用に関して高い評価が得られた。その他のコメントとして、自動生成されたコンテキストの修正の必要性やシナリオに基づく訓練実施のファシリテーションの必要性が指摘された。

プロジェクト後半で行っ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における議論では、シミュレーションするシナリオ候補として、内閣府南海トラフの巨大地震モデルの検討会が作成した震度分布・浸水域等に関する被害予想データのうち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が挙げられた。これらのシナリオは 2-2-5 で示した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シミュレーションの初期設定として利用される。

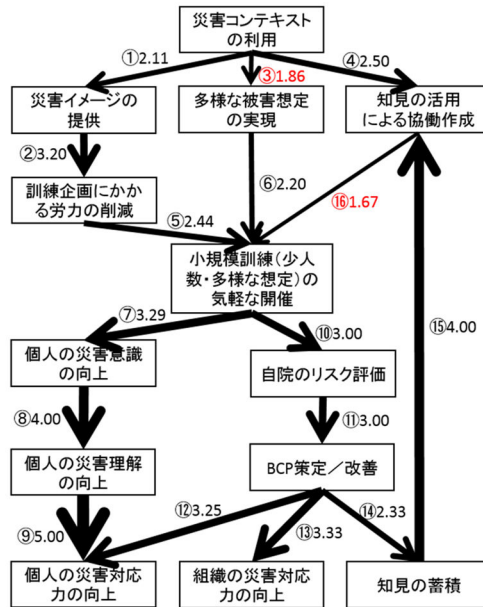


図 38 ソフトウェアの利用に関する評価

3-2-7. リアクティブな意思決定による復旧計画

インフラの損害に関する完全で正確な情報が入手可能な場合に、復旧計画は様々な目的関数に基づく何らかの最適化手法を用いて作成することができる。しかし、被災情報が不完全であったり不正確だったりした場合、新しい情報が到着するたびに最適化をやりなおして再計画する必要が生じてくる。そこで、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。

提案手法の有効性を確認するため、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った。その結果、異なる複数の重要インフラに対する優先順位付けがトリアージ原則によって自然に行えること、情報の遅延や欠落があった場合を想定しても最終的な復旧完了時間に与える悪影響が抑制されるような計画が可能であることが確認され、開発した計画作成法が厳密な最適化に基づく手法よりもロバストな手法であることが示された。

この成果を緊急時における社会のレジリエンス向上に直接反映させる手法としては、実際の重要インフラ復旧における意思決定を本手法で支援することが考えられる。この場合、各インフラ事業者が組織ごとに行う復旧活動よりは、異種インフラを統合した政府、自治体、業界団体のレベルの利用者が活用する方が効果は大きい。しかしながら、現状では異種インフラの事業者間で復旧リソースを融通する仕組みはできていない。したがって、本テーマの成果から得られる政策的課題は、異業種間で復旧リソースを融通できるような社会的仕組みを検討することであろう。

また、緊急時には情報を1箇所に集めて最適計画の作成を追及するよりも、当面入手可能な情報に基づいて分散的かつリアクティブに行動することが、レジリエンスを高める上で有効であることが示された。この知見は、緊急事態対処における指揮命令系統の設計と運用に示唆を与えるものと思われる。すなわち、中央集権的、階層的なマネジメントばかりでなく、分散的でリアクティブなマネジメントが状況によっては有効である。したがって、状況に応じた柔軟な権限委譲やリソースの再配置といったことが可能な制度設計を検討する必要がある。これは、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。

3-2-8. 危機管理政策議論のレジリエンス分析

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。そこで、政策議論におけるリスク（議論の論理的な脆弱性）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。政策が機能する前提や政策の効果を分析し、それらの関係を論理的に記述するために主張や理由に対する反証の記述を許容する撤回可能ゴール構造表記法を用いた。撤回可能ゴール構造表記法およびその意味論を定義し、議論分析システムである Astah GSN の拡張機能として実装した。

開発した議論分析システムの機能を確認するため、現実に行われた「国土強靱化アクションプラン 2014」「政府の危機管理組織の在り方について（最終報告）」の資料を分析した。事例分析の結果、開発したシステムによって政策の副作用によるリスクやそれを軽減する政策など、政策議論の論理構造を明かにできることを確認した。また、専門家の介入は頑健性を変化させなかったが、頑健性の弱い箇所への専門家による反証が期待できることが示唆された。

政策決定の過程においては論理的に瑕疵のない議論が社会的に要求され、また、ある政策を採用することによって重大な副作用が生じる懸念も表明される。議会や行政機関などの政策決定者がこうした政策議論に対する脅威を回避するために、開発した手法は有効であると期待される。このシステムを会議の場などでリアルタイムに活用してチェックをかけることは、未来の電子会議などを除けば現実的であるとは言えない。一方、オフラインで事後的に議事録などを分析し、政策議論における不十分・不完全な論点の発見に活用するなどの利用には可能性がある。

3-2-9. 市民社会・社会活動の安全に係る政策・制度の選択肢研究

本研究プロジェクトでは、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。さらに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は、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)・学术界一体 (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ような提言をとりまとめた。

(1) 緊急事態対処に係る法制度

首都中枢機能を襲う首都直下地震や広範に太平洋沿岸域を襲う南海トラフ地震、重要施設などへのテロ攻撃やサイバー攻撃が複合的に襲う事態は、その直接的影響が国土の広範囲に及ぶとともに国の経済および公共の福祉に重大な影響を及ぼすと想定されるが、災害対策基本法を中心とした我が国の災害対策法制では対処困難である。このような認識に立ち、国家レベルでの緊急事態対処に係る法制度について二点提言する。

提言 1：国家レベルでの事態対処を主眼とする国内緊急事態対処法 (Civil Emergency and

Resilience Act) を制定すること。

社会経済活動が広域かつ重層的に繋がり相互依存性が高まっている現況、更にこの姿が進化する将来社会を見据えたとき、質や規模の異なるハザード・脅威が同時あるいはカスケードに顕在化し大規模複合災害となっても、国民の生命・健康、財産そして環境への損害を最小限に抑え、緊急事態により損なわれる可能性のある市民生活および社会経済活動を支える社会の重要な機能を早期に回復し、効果的かつ効率的に緊急事態対処、復旧・復興を実現するためには包括的で実効的な法制度を構築する必要がある。

国内緊急事態対処法（仮称）の設計に際しては、以下の点を検討し規定することが望まれる。

- ① 現在個別法（災害対策基本法、国民保護法、警察法、自衛隊法など）で規定されている「緊急（対処）事態」を統一的に定義するとともに、具体的な構成要件を明確化する。具体的には、当該事態の発生によりその直接的影響が国土の広範囲に及ぶとともに国の経済および公共の福祉に重大な影響を及ぼすため、政府が迅速かつ主導して対処するプッシュ型事態対処を念頭に、「緊急事態」を内閣法15条の内閣危機管理監が統理する事態を参考に“国民の生命、身体または財産に著しく甚大な被害が生じ、または生じるおそれがある緊急の事態”と定義することも一案である。なお、国家安全保障会議設置法にある重大緊急事態や国家緊急権の議論にある緊急事態とは明確に峻別する。
- ② 緊急事態の起因事象となるハザードや脅威としては、自然起因、技術起因及び人的行為起因のハザードを対象とし、いわゆるオールハザード・アプローチに基づく対処規定とする。これは、従来の災害類型別の対処規定ではなく、複合型の緊急事態を含む如何なる事態においても共通する国民の生命・健康、市民生活および社会経済活動を支える社会の重要な機能への影響を最小限に抑えることを最優先し、それを政府機関全体が一つの組織として直ちに総合力を発揮し効果的かつ効率的に行動するという考え方を基盤としている。
- ③ 国内緊急事態対処法は、破局的な事態を想定し、国が権限を発動するプッシュ型事態対処である。従って、従来の災害対策基本法を核としたプル型事態対処とは異なることを明確にし、その全体スキーム、関係主体の役割・権限・責任および発動要件・手続きを明確に規定する。
- ④ 緊急事態宣言によりスタンバイ法（後述）が執行されることを規定する。
- ⑤ 国民の生命・健康、市民生活および社会経済活動に重大な影響を潜在的にもたらすハザード・脅威に関する国家リスクアセスメントの実施を政府（国内緊急事態対処局）に義務付ける。同じく、広域行政区域（道州レベル）を設定し、地方公共団体共同による広域リスクアセスメントの実施を義務付ける。また、これらリスクアセスメントから得られる知見の活用（資源配分の優先順位付け、緊急事態対処能力の脆弱性同定、レジリエンス計画策定の基本情報、政府機関や地方公共団体におけるリスク認識の共有など）について規定する。
- ⑥ 重要インフラストラクチャ（日常生活に必要不可欠、または国家として社会的、経済的に継続するために必要な施設、システム、拠点、ネットワーク、サービス）であるエネルギー供給（電力、ガス、石油）、情報通信（通信、放送）、交通・物流（道路、鉄道、航空、海路、港湾）、水道（上・下水道、工業用水道）、金融、医療、食糧、緊急対応（自衛隊、警察、消防、避難所等）、政府機能（地方自治体を含む）の防護およびレジリエンス確保を明確に規定する。具体的には、重要インフラ事業を所管する府省庁に対してセクター・レジリエンス計画（年次、長期計画）の官民連携による策定を義務付ける。

提言2：緊急事態においてやむを得ず行われる超法規的措置を可能な限り減らすために、緊急事態において妥当すべき法、いわゆるスタンバイ法（行政法規の特例セット）を予め用意すること。

スタンバイ法を予め準備することは、1)現場の行政官に、法を遵守するか、危険除去や迅速な復興のための措置のために不法を甘受するかを判断を強いることも防ぐことができる、2)平時において検討することにより費用対効果を考慮した合理的な判断が可能となる、3)平時の備えとし

て、スタンバイ法の制定と適用訓練は、中央省庁、地方公共団体の行政官、法適用対象業界等に対し、想像力を働かせ想定外を減らす思考実験の機会を提供、法制度適用の訓練を強いる、という意義をもつ。スタンバイ法の主なポイントは以下の通りである。

- ① 阪神淡路大震災や東日本大震災そして福島第一原発事故の大規模災害における被害拡大局面や復興局面で認めた法制度上の特例措置、中央省庁の通知によって行われた規制緩和措置（一種の超法規的措置を含む）を洗い出すとともに、緊急事態時の緩和措置などの運用要件について官民で検討・協議し、行政法規の特例セットを用意する。
- ② 法律に関しては、平時の法律に対する特例を認める法律を作動させるための要件を法律上定めておき、その要件充足の認定権限、当該特例の空間的・時間的な適用範囲を、政令で定める（閣議が召集できないときは内閣総理大臣が定める）。同様に、地方公共団体においても、議会が召集できないときに備えて、条例の特例措置を定め、その発動を知事の権限に委ねるような規定を整備しておくことが考えられる。
- ③ スタンバイ法の適用は、前述した国内緊急事態対処法に基づく緊急事態の宣言により執行される。執行期間延長については国会承認を要件とした執行権の権限乱用の歯止めを用意する。なお、特例措置の一括適用か部分適用については緊急事態の特性に依存することに留意し、その実施方法を検討する必要がある。
- ④ 緊急時の対応では、行政が民間事業者等に要請して協力を得ることが基本となっている。行政が要請をこえて強制力をもって民間事業者等に対して（必要な）措置を講じるとされている場面において、現状ではその根拠法は平時の許認可・命令権限に求められているが、スタンバイ法により緊急時における行政の権限を明確にする。

(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

平成27年3月にまとめられた政府の危機管理体制の在り方に関する関係副大臣会議の報告書は“現行体制でよし”と結論したが、直接的影響が国土の広範囲に及ぶとともに国の経済および公共の福祉に著しく甚大な影響を及ぼす事態に政府機関が一体的に迅速に効果的かつ効率的に対処、復旧・復興を実現するために必要な機能とは何か、その組織制度をどう設計すべきかの検討が必要である。このような認識に立ち、国家レベルの事態対処・危機管理機能に係る制度・組織設計について三点提言する。

提言1：国内緊急事態対処局（仮称、Civil Emergency and Resilience Secretariat）を内閣官房に創設し、国家レベルの危機管理・レジリエンス機能の強化を図ること。

政府の初動対応体制は現在、内閣危機管理監の統理の下、ハザードの種類に関わらず内閣官房（事態対処・危機管理担当）で一元的に総合調整されるが、その機能を初動時に限らず事態終息・回復まで継続し強化することが重要と考える。

現在の我が国の内閣危機管理監を中心とした事態対処・危機管理体制の下に、内閣官房（内閣サイバーセキュリティセンター、国土強靱化推進室、新型インフルエンザ等対策室、空港・港湾水際危機管理チーム、国際感染症対策調整室）、内閣府（防災担当）、中央防災会議を一元化し、国内緊急事態対処局を創設し、内閣危機管理監を局長とする。国内緊急事態対処局は国内緊急事態対処法を所管し、国民の生命、身体または財産に著しく甚大な被害が生じ、または生じるおそれがある緊急の事態への準備、対応（危機管理、影響管理）、回復の3段階に関わる危機管理・レジリエンス全般の政策形成と府省庁横断的な調整を担う政府司令塔機能を担う。国内緊急事態対処局は、国防、重大緊急事態対処および国家安全保障に関する外交・防衛政策の基本方針・重要事項を扱う国家安全保障局と対をなすものと位置づける。国内緊急事態対処局では、以下の事項を所掌する。

- ① 緊急事態対処に備える国家リスクアセスメント（NRA）の実施・活用

国内緊急事態対処局長は NRA の実施責任者として、府省庁間リスク評価作業部会（仮称）を設置し、府省庁連携・部門横断の下、NRA を実施する。NRA から得られる知見、特に共通的コンセカンズ（緊急事態の結果として合理的に予想される被害の最大規模や被害継続期間や影響を含む）の情報はレジリエンス強化戦略の基本情報として、国内緊急事態対処局は国家レジリエンス計画想定において参考とし、国家レジリエンス能力プログラムを策定する。そのため内閣官房国土強靱化推進室の役割と人材は再考することが望ましい。

② 府省庁横断的対応を可能とする主導・支援省庁システムの設計と府省庁業務継続計画の総合的観点からのチェック

現在の緊急事態対処は、内閣官房の総合調整後、各府省庁が緊急事態の種類により規定された根拠法に基づき所掌事務に関して分担し、それぞれが一義的に判断し対応する、いわゆる分権的・多面的なシステムである。オールハザード・アプローチによる緊急事態対処の実現には、分権的・多面的システムを前提とするなら、各府省庁は当該所管業務の社会的機能面から見た時間的展開も考慮した相互依存性を明らかにし、効果的に社会的機能確保を可能とする新たな仕組み（主導省庁、支援省庁の指定と各権限と責任）を設計する必要がある。検討にあたっては、英国の LGD（主導省庁）システムや米国 NRF（国家対応枠組み）の緊急事態援助機能 ESF が参考になる。国内緊急事態対処局は、府省庁の協力を得て上述の設計を行うとともに、この仕組みの設計過程で明らかとなる府省庁業務の相互依存性に係る知見に基づき、政府機関一体の観点から各省庁の業務継続計画の整合性・十分性を精査する。

③ スタンバイ法の執行状況の監督

国内緊急事態対処法に基づく緊急事態の宣言によりスタンバイ法を発動する。国内緊急事態対処局は、特例措置の一括適用か部分適用については緊急事態の特性に依存することに留意し、決定し、関係府省、地方公共団体、指定公共機関に適用する特例措置リストを速やかに通知するとともに、特例措置の執行状況を監督する。

④ 重要インフラ防護・レジリエンス強化に関する諮問委員会の設置・運営

各重要インフラ・セクターのオールハザードに対する脆弱性及びリスクの把握（セクター・レジリエンス計画策定を義務化）を行い情報および認識の共有を図るため、重要インフラ事業を所管する省庁・部局の合同会議を組織する。この合同会議の結果を基に、リスク緩和及びレジリエンス方策に関する省庁横断的な資源の配分と優先順位付けを行う国内緊急事態対処局長の諮問委員会（財務省は必須）を設置する。

⑤ 重要インフラ事業のセクター・レジリエンス計画策定の支援とパートナーリングの強化

国家レベルの危機管理・レジリエンス機能の強化を図るには、民間の重要インフラ事業者も含めた相互の能力（コケイパビリティ）の醸成が重要であるため、セクター・レジリエンス計画の策定にあたっては、業界団体を通じたインフラ事業者との連携により集合的な脆弱性・脅威を評価し、知見と認識の共有を通しパートナーリングの強化を図る。その際、国内緊急事態対処局は、重要インフラに対する共通的な脅威シナリオ(攻撃方法,戦術)、全般的な脅威環境、インフラ別の脅威情報(インテリジェンスベース)を提供する。

⑥ 緊急時総合調整システムの構築と状況認識能力の高度化

大規模な緊急事態対処は大規模なマネジメントを要する複雑な作業である。プッシュ型事態対処においても、あらゆる事態に共通する非常に基礎的な部分は標準化を図り、現場には自律的権限を与え臨機応変な対応を可能とすることが重要である。指揮・組織運営能力の向上に向け、米国の国家事態管理システム NIMS で活用されている ICS を参考に緊急時総合調整システムを構築する。緊急事態対処局は、多次元情報を収集・共有・表示する統合的なアプリケーションによる状況認識能力の高度化と関係者間で状況認識を提供・共有するインターオペラブルなシステムの構築を図る必要がある。

⑦ 緊急事態における科学的助言システムの構築と運用

国内緊急事態対処局にも社会的機能確保の観点から学術・実務分野の専門家から構成される科学的助言システムを構築、運用することが求められる。

提言 2：各省庁に緊急事態対処の専門部署（Emergency and Resilience Division）の設置および緊急時の科学的助言システムを構築すること。

現行の府省庁の緊急事態対応の組織構造は、平時業務の延長から想定された非常時優先業務（非常事態対応業務と重要一般業務）に基づき設計されている。従って、業務担当者は訓練を通して緊急時におけるスキルを獲得するが、本質的に平時の業務、思考を持つため、著しく甚大な被害が生じる事態への対処能力や思考の醸成は有しているとは言えない。そのため、各省庁（特に国土交通省、経済産業省、総務省、外務省、環境省）に省内横断的でオールハザード対応の部署（省内の総合調整、国内緊急事態対処局及び主導・支援省庁とのリエゾン機能、セクター・レジリエンス計画策定の事務局機能）を大臣官房に創設し、平時より緊急事態対応を専門とする人材を育成することが望ましい。国内緊急事態対処局を実効的な組織とするには緊急事態対処能力・経験を有する人材の育成は重要な課題であるため、上述した各省庁の部署の経験者を集め政府一体アプローチの中核人材としていく仕組みを構築することが望ましい。また国内緊急事態対処局同様、各省庁にも学術・実務分野の専門家から構成される科学的助言システムを構築、運用することが望ましい。

提言 3：政府レベルでの戦略的フォーサイト機能を有すること。

国家のリスクマネジメント・緊急事態対処能力の開発・改善が一層重要課題となる状況において、その基盤として将来社会の姿を俯瞰的に洞察する活動とその能力の醸成が必要である。この活動からの情報は、NRAを実施するうえで、将来社会を踏まえた合理的な最悪シナリオを作成するためにも重要である。

(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

本研究プロジェクトでは、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が、これを重要インフラ防護・レジリエンス強化のための政策立案に資する情報にするにはセクター横断かつ府省庁横断での協力体制が不可欠であり、府省庁横断的研究課題を推進するスキームが必要である。このような認識を踏まえ、重要インフラ防護・レジリエンス強化のための研究政策・制度について四点提言する。

提言 1：分野横断かつ省庁横断的な俯瞰的研究を継続的に実施可能とするスキームを構築すること。

重要インフラの防護とレジリエンス強化にはシステムズ・アプローチに基づいた多様なハザード・脅威に対するシステム挙動への理解を深めることがまず重要である。これがホリスティック、クロス・ガバメント・アプローチの基礎となる。重要インフラを取り巻くリスク環境や政治環境や運用環境、重要インフラの分散ネットワーク構造、物理的空間及びサイバー空間での機能的相互依存、重要インフラ事業者の異なる組織構造や経営形態、規制等を含むガバナンス構造について、自然科学・工学そして社会科学・政策科学を統合した包括的な研究プログラムを推進する必要がある。そして、これらの研究プログラムを進めるには、学際性はもとより重要インフラ事業者そしてそれらを所管する府省庁からの協力が不可欠であり、更にはその研究資金が継続的に確保されることが必要となる。国内緊急事態対処局は、関係省庁と協議・連携し、クロス・ガバメント研究体制を検討すべきと考える。そして、継続的な研究体制を通して、複雑化する社会における緊急事態対処に求められる戦略的思考、システム思考、実務的スキル、社会対話スキルを有

する人材の育成、技術的・政策的・社会的イノベーションの継続的探索を実現することが重要である。

提言 2：緊急事態対処の観点から防災調査研究のあり方を再考すること。

我が国における防災に関する調査研究は、緊急事態対処の具体的ニーズとミスマッチしており、研究の資源配分の俯瞰的・戦略的判断ができておらず、また政策立案や意思決定に効果的に反映される仕組みがない。国内緊急事態対処局は、防災に係る研究機関を所管する府省庁（特に文部科学省）の緊急事態対処の専門部署（提言 2-2）との間で実効的な調査研究計画及びその活用方策について協議、連携することが望ましい。

提言 3：オールハザードを対象とした緊急事態対処・レジリエンスに関する大学 COE プログラムを創設し、先端研究および教育を推進し、緊急事態対処を担う行政・学術・産業界の次世代の人材を育てること。

我が国には米国国土安全保障省という緊急事態対処を専門とする政府機関はないが、緊急事態対処に係る準備・対応・復旧の政策立案、実行を支える「政策のための科学」は必要である。この実現には、産官学の連携、具体的には大学に産官学共同ラボ（常駐研究者派遣）を置き COE として現場への実装を念頭に先端的・学際的研究を進めることが望ましい。そして、大学において当該分野の教育を行い、我が国の緊急事態対処を担う行政・学術・産業界の次世代の人材育成を図ることが重要である。

提言 4：重要インフラ事業のセクター・レジリエンス計画策定を通して官民パートナーリングの強化を図ること（(2)提言 1⑤再掲）

(4) 首都圏の緊急事態対処に係る行政的課題

我が国の国家統治中枢機能及び経済中枢機能が集積、それに伴い「ヒト、モノ、カネ、情報」及びそれらを支える重要インフラが高度に集積、それらの相互依存関係は極めて複雑となっている首都圏の緊急事態対処に係る行政的課題について五点、早急に検討することを提言する。

提言 1：首都圏における合理的な最悪事態シナリオを複数想定し、包括的なリスクアセスメントを早急に実施すること。

首都圏自治体（東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県）は、オールハザードを対象とした合理的な最悪シナリオを複数作成し、包括的なリスクアセスメントを共同して実施する必要がある。また国内緊急事態局は国家リスクアセスメントの一つとして首都中枢機能が不全状態に至ったシナリオを評価する必要がある。そして、これらリスクアセスメントから得られた知見は資源配分の優先順位付け、緊急事態対処能力の脆弱性同定、レジリエンス計画策定、政府機関や地方公共団体におけるリスク認識の共有に活用しなければならない。その意味で 2020 年東京オリンピック・パラリンピックのリスクアセスメントはエクササイズとして早急に実施すべきである。

提言 2：首都中枢機能確保に係る目標と業務を定めた上で、業務の主導・支援省庁システムを設計し、政府として首都中枢機能確保の業務継続計画の十分性、実効性を精査すること。

国内緊急事態対処局は、首都中枢機能確保に係る目標と業務を定めたうえで、係る業務（他機関による業務との相互依存性を考慮）の主導省庁システムを設計し、政府として首都中枢機能確保の業務継続計画の十分性、実効性を精査することが必要である。これにより、各府省庁は首都中枢機能確保と災害対応業務への資源配分を予め明確化し、業務継続計画をより実効的にするこ

とが可能となると考える。

提言 3：首都圏の緊急事態対処のスタンバイ法を予め用意しておくこと。

首都圏ゆえに考慮すべき被害拡大局面や復興局面での法制度上の特例措置などを予め洗い出し、スタンバイ法として準備しておくことが重要である。また、東京都自身も平時の条例や許認可等の行政措置が被害拡大局面や復興局面において不合理となる可能性があるか精査し、行政措置の特例セットを予め用意しておくことが望ましい。

提言 4：首都東京都の特殊性（警察制度・消防制度と特別区制度）を踏まえた、緊急事態対処上の課題と方策を検討しておくこと。

東京都は早急に次の点について検討すべきである；1)他の自治体とは異なる独自の事情、すなわち膨大な人口（住民、帰宅困難者、訪問外国人等）、首都中枢機能の集中、特別区制度等の制度を有するという点からも、独自の受援計画を確実に策定し、他自治体及び国からの応援をスムーズに受け入れる体制を整えること、2)区市町村の実態（規模や能力など）を考慮し、住民の避難・救助・救急・救援、生活復興の段階に沿って、都と区市町村の実効的な役割分担を明らかにすること。

提言 5：政府対策本部、政府現地対策本部、被災都県対策本部の役割について改めて検討し、実効性ある体制を構築すること。

首都圏においてプッシュ型事態対処が発動された場合、政府対策本部、政府現地対策本部、そして被災都県対策本部の業務負荷は大きく異なり場合により過剰となることが予想されるため、各対策本部の役割を改めて検討・確認し、実効性ある体制を構築しなければならない。

3-3. 学術的成果、人材育成やネットワーク拡大への貢献等

3-3-1. 科学技術イノベーションに対する貢献

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、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、レジリエンスが有力な概念であることを示した。

3-3-2. 海外研究者との交流と人材育成

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、人材育成にも貢献した。

3-4. 成果の発展の可能性

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。

4. 関与者との協働、成果の発信・アウトリーチ活動

4-1. 研究開発の一環として実施した会合・ワークショップ等

名称	年月日	場所	規模 (参加人数等)	概要
第1回 RISTEX-CIR 研究会	H25.10.25 ~26	KKR 千歳荘 (伊豆長岡)	8名	各参加メンバーの役割分担の確認と、当面の課題の検討
第2回 RISTEX-CIR 研究会	H25.1.20	東京大学 工学部8号館	10名程度	進捗状況の報告と、米国への訪問調査の計画調整
第3回 RISTEX-CIR 研究会	H26.4.4	東京大学 工学部8号館	10名程度	進捗状況の報告と、H25研究開発実施報告のため

				の調整
第4回 RISTEX-CIR 研究会	H26.7.16	東京大学 工学部 8 号館	10 名程度	進捗状況の報告
第5回 RISTEX-CIR 研究会	H27.1.19	東京大学 工学部 8 号館	10 名程度	進捗状況の報告と、3.11 開催のワークショップの 打ち合せ
第6回 RISTEX-CIR 研究会	H27.4.25	東京大学 工学部 8 号館	10 名程度	進捗状況の報告と H26 研 究開発実施報告のための 調整を行った
第7回 RISTEX-CIR 研究会	H27.8.28	東京大学 工学部 8 号館	10 名程度	進捗状況の報告
第8回 RISTEX-CIR 研究会	H28.2.23	東京大学 工学部 8 号館	10 名程度	進捗状況の報告と最終年 度の研究計画について協 議した
第9回 RISTEX-CIR 研究会	H28.4.25	東京大学 工学部 8 号館	10 名程度	専門家ワークショップの打 合せを行った
グループリーダー打合 せ	H28.3.3	東京大学 工学部 3 号館	3 名	開催予定の専門家ワークシ ョップの内容について検討 した
第1回レジリエンス政 策研究会	H26.4.22	東京大学伊藤国際 学術研究センター 特別会議室	10 名程度	伊藤哲朗・東京大学客員教 授、前内閣危機管理監 「緊急事態における我が 国の危機管理体制と危機 管理の課題」
第2回レジリエンス政 策研究会	H26.5.20	東京大学伊藤国際 学術研究センター 特別会議室	10 名程度	寺谷俊康・厚労省大臣官房 健康危機管理・災害対策室 室長補佐「医療・公衆衛生 領域の健康危機管理・災害 対策について」
第3回レジリエンス政 策研究会	H26.6.17	東京大学伊藤国際 学術研究センター 特別会議室	10 名程度	小川英雄・前静岡県危機管 理監「地方自治体における 危機管理業務の課題」
第4回レジリエンス政 策研究会	H26.7.15	東京大学伊藤国際 学術研究センター 特別会議室	10 名程度	原田忠義・防衛省運用企画 局事態対処課 国民保護・ 災害対策室長「自衛隊の災 害派遣と国民保護措置の 実施について」
第5回レジリエンス政 策研究会	H26.9.1	東京大学工学部 3 号館 TMI 専攻ラ ウンジ講義室	10 名程度	Prof. L.K.Comfort (Director of CDM, University of Pittsburgh) “Building a Global Commons: Resilience in

				Managing Extreme Events”
第6回レジリエンス政策研究会	H26.9.16	東京大学伊藤国際学術研究センター特別会議室	10名程度	中井亨・内閣官房行政改革推進本部事務局参事官「内閣官房行政改革推進本部における最近の施策・動向について」
第7回レジリエンス政策研究会	H26.11.17	東京大学伊藤国際学術研究センター特別会議室	10名程度	富井幸雄・首都大東京法科大学院教授「Civil Emergency と国家的対応—軍出動を中心として:カナダとアメリカの法制と日本の課題」
第8回レジリエンス政策研究会	H27.1.20	東京大学伊藤国際学術研究センター特別会議室	10名程度	前田哲也・東京都総務局総合防災部計画調整担当課長「東京都の防災対策(被害想定・地域防災計画について)」
「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」プログラムサロン(第8回)	H28.9.20	JST 東京本部別館	20名程度	セミクローズドな場での成果発表と指名専門家からのコメント聴取

4-2. アウトリーチ活動

4-2-1. 主催したイベント

- (1) 社会レジリエンス向上のための政策技術に関するワークショップ、平成27年3月11日、東京大学工学部3号館31講義室、30名程度、総合的レジリエンス評価の試みについて高い関心を得た
- (2) 社会レジリエンス向上のための政策技術に関する専門家ワークショップ、平成28年7月3日、東京大学工学部3号館TMI専攻ラウンジ講義室、16名、企業活動・市民生活を含む相互依存性を考慮したモデルは専門家から高く評価された
- (3) 社会レジリエンス向上のための政策技術に関するシンポジウム、平成28年11月30日、東京大学工学部11号館講堂、50名程度、プロジェクトの成果を発表し高い評価を得た

4-2-2. ウェブサイト構築

- (1) レジリエンス工学研究センター 研究プロジェクト、<http://rerc.t.u-tokyo.ac.jp/project1.html>、2013/10

4-2-3. 招聘講演

- (1) K. Furuta (UTokyo), “Human-Centered Perspective in Resilience Engineering”, Lloyd’s Register Foundation Workshop on Resilience Engineering, Hoboken, NJ, US, 2015.4.15.

- (2) T. Taniguchi (UTokyo) “Institutional Challenges for Building and Maintaining A Secure and Resilient Japan”, 3rd Deans Forum Workshop on Resilience Engineering, Tokyo, 2015.11.30.
- (3) 古田一雄 (東京大学) 「レジリエンス工学：リスクマネジメントのシステム論的展開」 エネルギー・資源学会第5回政策懇話会, 東京, 2016.1.15.

4-2-4. その他

- (1) レジリエント・ガバナンス研究会報告書、産業競争力懇談会 COCN・東京大学政策ビジョン研究センター、2014.3.3. http://pari.u-tokyo.ac.jp/policy/policy140327_cocn.pdf
- (2) 太田響子 (東京大学) 「オリンピックという緊急事態」東京大学政策ビジョン研究センター 2016/2/22 コラム <http://pari.u-tokyo.ac.jp/column/column140.html>
- (3) 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/>
- (4) 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/>

4-3. 新聞報道・投稿、受賞等

4-3-1. 新聞報道等

- (1) 日刊工業新聞 (2016年3月14日) 28面「深層断面 『想定外』のリスクに備えレジリエンスの研究進む」

5. 論文、特許等

5-1. 論文発表

5-1-1. 査読付き (5件)

- (1) V. Lubashevskiy, T. Kanno, K. Furuta (2014), “Resource Redistribution Method for Short-Term Recovery of Society after Large-Scale Disasters, Advances in Complex System”, 17/5, 1450026, doi: 10.1142/S021952591450026X
- (2) H. Kido, Y. Ohsawa, K. Nitta (2015) “Paretian Argumentation Frameworks for Pareto Optimal Arguments”, Journal of Logic and Computation, doi: 10.1093/logcom/exv012
- (3) 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
- (4) 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)
- (5) 太田響子 (2016) 「イギリスにおける政府一体型の危機管理制度とその運用—省庁間、中央地方間、官民間の観点から」『季刊行政管理研究』156 (掲載決定済)

5-1-2. 査読なし (2件)

- (1) 谷口武俊 (2015) 「エネルギーとレジリエンス」『エネルギー・資源』36/1、14-18
- (2) 古田一雄、菅野太郎 (2016) 「レジリエンス工学の誕生と展望」『システム/制御/情報』60/1、3-8

5-2. 学会発表

5-2-1. 招待講演 (国内会議 1件、国際会議 4件)

- (1) 菅野太郎 (東京大学) 「人間中心のレジリエンス工学 (基調講演)」第 21 回信頼性設計技術 WS & 第 34 回最適設計研究会、東京大学、2014.9.19.
- (2) K Furuta, T. Kanno (UTokyo), “Service Systems Resilience – Interdependencies between Service, Infrastructure, and Life Systems”, Deans Forum 2nd Workshop on Resilience Engineering, MINES Paris Tech, Paris, 2013.11.18.
- (3) T. Taniguchi (UTokyo), “Institutional Challenges for Building and Maintaining A Secure and Resilient Japan”, Workshop on Risk and Security – Redefining the Concept and the Structure of Governance, The University of Tokyo, 2014.7.16.
- (4) K. Furuta (UTokyo), “Human-Centered Interdependency Analysis of Critical Infrastructure”, 3rd Deans Forum Workshop on Resilience Engineering, Tokyo, 2015.11.30.
- (5) K. Furuta, R. Komiyama, T. Kanno, H. Fujii, S. Yoshimura, T. Yamada (UTokyo), “Interdependency Analysis of Multiple Lifeline Systems”, World Engineering Conference and Convention (WECC) 2015, Kyoto, 2015.12.2.

5-2-2. 口頭発表 (国内会議 17件、国際会議 13件)

- (1) 三田尚貴、藤井秀樹、吉村 忍 (東京大学) 「大規模マルチエージェント交通流シミュレーションのための経路探索の並列化」第 19 回計算工学講演会、広島国際会議場、広島、2014.6.12.
- (2) 三田尚貴、藤井秀樹、吉村 忍 (東京大学) 「広域性と精緻性をそなえた交通流シミュレータのための経路探索の並列化」日本機械学会第 27 回計算力学講演会、盛岡、2014.11.24.
- (3) 藤井秀樹、吉村 忍 (東京大学) 「大規模微視的交通流シミュレーションの効率化」日本機械学会第 27 回計算力学講演会、盛岡、2014.11.24.
- (4) 松澤宏務、小宮山涼一、藤井康正 (東京大学) 「確率計画法による災害リスクを考慮した関東圏のエネルギーシステム強靱化に関する分析」第 31 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、エネルギー・資源学会、東京、2015.1.27.
- (5) 松澤宏務、小宮山涼一、藤井康正 (東京大学) 「近似動的計画法による災害リスクを考慮した蓄電設備の最適貯蔵運用および最適電源構成に関する分析」第 34 回エネルギー・資源学会研究発表会、東京、2015.6.9.
- (6) 白崎 旬、藤井秀樹、吉村 忍 (東京大学) 「大規模ネットワークを対象とした並列化交通流シミュレーションの性能評価」第 20 回計算工学講演会、つくば、2015.6.10.
- (7) 白崎 旬、藤井秀樹、山田知典、吉村 忍 (東京大学) 「領域分割法を用いた大規模交通シミュレーションの高速化」日本機械学会第 28 回計算力学講演会、横浜、2015.10.12.
- (8) 松澤宏務、小宮山涼一、藤井康正 (東京大学) 「確率動的計画法による関東圏のエネルギーシステム強靱化に関する分析」平成 27 年電力・エネルギー部門大会、電気学会、名古屋、2015.8.25.
- (9) 鈴木 尊、吉田佑一、菅野太郎、古田一雄 (東京大学) 「複合的相互依存性モデルを用いた災害復旧シミュレーションと東京 23 区への適用」システム創成学学術講演会、東京、

2016.1.20.

- (10) 松澤宏務、小宮山涼一、藤井康正 (東京大学)「数理計画法による電力・石油供給レジリエンスの向上策に関する分析」第 32 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演会、エネルギー・資源学会、東京、2016.2.3.
- (11) 松澤宏務、小宮山涼一、藤井康正 (東京大学)「大規模地震リスクに対する首都圏のエネルギー供給レジリエンスに関する経済性評価」平成 28 年電気学会全国大会、仙台、2016.3.18.
- (12) 白崎 旬、内田英明、藤井秀樹、山田知典、吉村忍「マルチエージェント型交通流シミュレータの並列化と性能評価」第 21 回計算工学講演会、新潟、2016.6.2.
- (13) 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、東京、2016.7.8.
- (14) 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、東京、2016.7.8.
- (15) 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、2016.7.8.
- (16) 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、東京、2016.7.8.
- (17) 藤井秀樹、内田英明、吉村忍 (東京大学)「微視的交通流シミュレータを用いた都市道路網のレジリエンス分析」日本機械学会 2016 年度年次大会、福岡、2016.9.12.
- (18) T. Kanno, K. Ono, S. Hong, K. Furuta (UTokyo), “Disaster Context Modeling for the Creation of Exercise Scenarios”, 12th Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management, Honolulu, USA, 2014.6.26.
- (19) V. Lubashevskiy, T. Kanno, K. Furuta (UTokyo), “Resource Redistribution after Large Scale Disasters: Case with Gradually Updated Information”, 14th International Conference on Systems Simulation (AsiaSim 2014), Kitakyushu, 2014.10.27.
- (20) H. Kido, Y. Ohsawa (UTokyo), “Defensibility-based Classification for Argument Mining”, 4th IEEE ICDM Workshop on Data Mining in Networks (DaMNet 2014), Shenzhen, China, 2014.12.14.
- (21) H. Kido, T. Takai (UTokyo), “Encouraging Critical Communication with Defeasible Goal Structuring Notation”, International Workshop on Logical Analysis of Descriptions and their Representations, Talk, 2015.1.28.
- (22) T. Kanno, S. Hong, K. Tanaka, T. Yamashita, S. Sharikura, K. Furuta (UTokyo), “Collaborative Resilience Management - Support System for Collaborative Creation of Disaster Exercise Scenarios”, 6th REA Symposium, Lisbon, Portugal, 2015.6.23.
- (23) V. Lubashevskiy, T. Kanno, K. Furuta (UTokyo), “Recovery of urban socio-technical systems after disaster: The reactive method of planning and implementation”, European Safety and Reliability (ESREL) Conference 2015, Zurich, Switzerland, 2015.9.8.
- (24) T. Kanno, T. Suzuki, K. Furuta (UTokyo), “Simulation of the Post-Disaster Recovery Process of Urban Socio-Technical Systems”, European Safety and Reliability (ESREL) Conference 2015, Zurich, Switzerland, 2015.9.9.
- (25) D. Chao, Y. Watanabe, T. Kanno, K. Furuta (UTokyo), “Resilience Assessment of Telephone Communication Network”, 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (JSST2015), Toyama, 2015.10.12.
- (26) N. Mita, H. Uchida, H. Fujii, S. Yoshimura (UTokyo), “Speedup of Dynamic Route

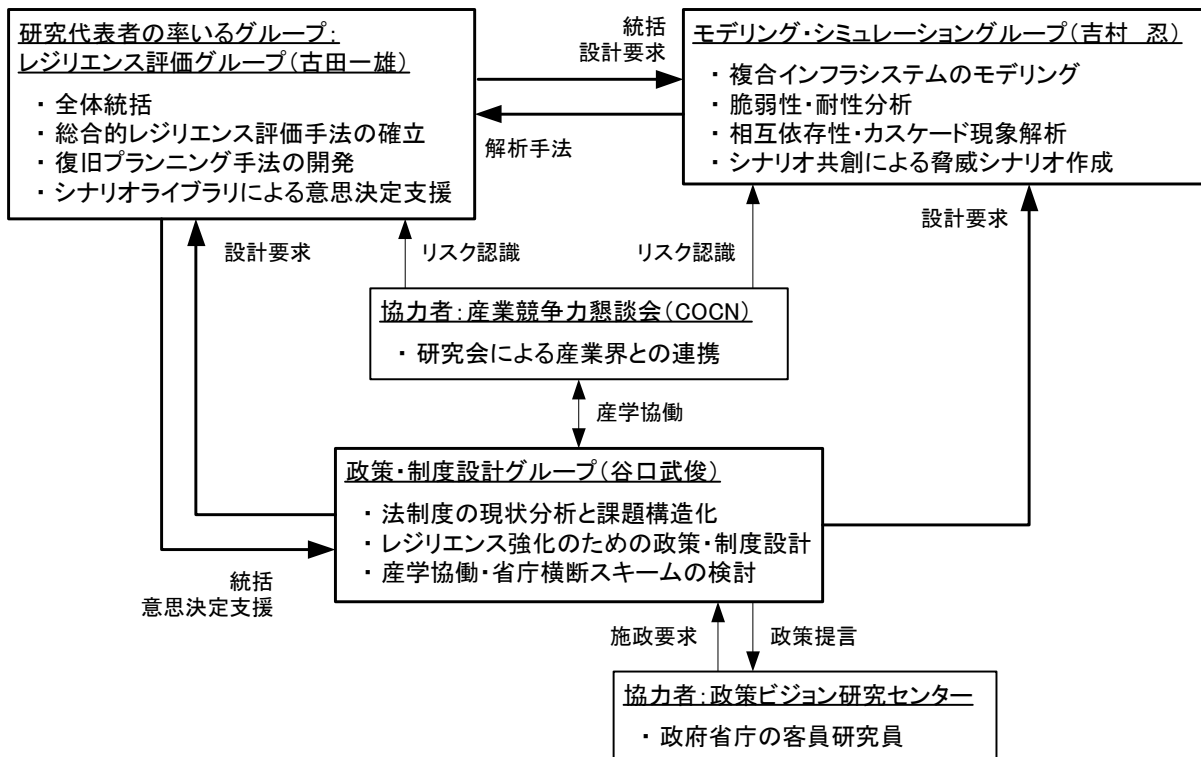
- Search for Large-scale Microscopic Traffic Simulation”, 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology (JSST2015), Toyama, 2015.10.14.
- (27) K. Furuta, R. Komiyama, T. Kanno, H. Fujii, S. Yoshimura, T. Yamada (UTokyo), “Resilience Analysis of Critical Infrastructure”, 10th International Conference on Computer Engineering and Applications (CEA’16), Barcelona, Spain, 2016.2.14.
- (28) T. Kanno, T. Suzuki, Y. Yoshida, K. Furuta (UTokyo), “Simulation of Post-Disaster Recovery for Building Resilient Tokyo”, International Conference on Building Resilience: USB.No.14, Auckland, New Zealand, 2016.9.9.
- (29) V. Lubashevskiy, T. Kanno, K. Furuta (UTokyo), “Recovery of urban socio-technical systems after disaster: Reactive decision-making based planning under uncertainties of damage evaluation”, European Safety and Reliability (ESREL) Conference 2016, Glasgow, UK, 2016.9.26.
- (30) D. Chao, Y. Watanabe, T. Kanno, K. Furuta (UTokyo), “Modeling and resilience assessment of a telephone communication network”, European Safety and Reliability (ESREL) Conference 2016, Glasgow, UK, 2016.9.26.

5-2-3. ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 0 件)

- (1) 太田響子 (東京大学) 「危機管理政策における中央省庁の制度設計：組織編制と調整」日本行政学会 2015 年度研究会、那覇、2015.5.9.

6. 研究開発実施体制

6-1. 体制



研究開発実施体制

【特記事項】

- ・工学系と政策科学系の研究組織の協働体制
- ・政策研究と復旧計画手法開発を担当する専任の特任研究員 2 名の採用
- ・進捗に対応した参加研究者、研究協力者の交代や追加
- ・学部学生、院生の参加による人材育成への貢献
- ・レジリエンス政策研究会を通じた専門家、実務経験者との交流、アウトリーチ

6-2. 研究開発実施者

末尾に掲載

6-3. 研究開発の協力者・関与者

末尾に掲載