

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15264

研究課題名（和文）災害レジリエンス向上の定量評価と震災復旧戦略検討システムへの応用

研究課題名（英文）Quantitative Evaluation of Improved Disaster Resilience and Application to Earthquake Disaster Restoration Strategy Support System

研究代表者

高橋 亨輔（Takahashi, Kyosuke）

香川大学・創造工学部・准教授

研究者番号：60647262

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：研究成果は次の3点である：1) 災害レジリエンス向上モデルを導入した震災時の道路復旧計画策定を開発した。システムの性能低下から回復に至るグラフの面積を最小化するレジリエンスの三角形の評価方法を導入し、道路復旧のみ優先する単目的計画策定手法、道路復旧と物資搬送など異なる復旧目的を同時に考慮する多目的計画策定手法を開発した。2) 震災復旧戦略検討システムを開発し、インターネット上で公開した。3) 香川県のモデル地域において市町規模の震災復旧戦略を検討した。香川道路啓開計画の指定道路に地域の建設業が進出するための道路や被災地域の住民の生活道路も考慮し、市町としての復旧優先順位の設定の必要性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、研究代表者が開発する震災時の道路ネットワーク復旧計画策定手法に、災害レジリエンス向上モデルを導入し、震災復旧戦略検討システムを開発した。大規模広域災害の発生時において、被災からしなやか（レジリエント）に復旧するには、事前に道路ネットワークの復旧戦略を検討することが重要である。本研究は、震災直後の道路復旧計画策定を対象にこれまで概念が先行してきたレジリエンスの具体的な社会実装に取り組んだ。本研究により、防災・危機管理対策の効果を災害レジリエンスの向上という観点から定量的に評価できれば、震災時の多様な復旧戦略が比較・評価・検証が可能になり、効果的な被害低減対策への活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The research results are summarized as follows: 1) We developed a method for scheduling road restoration in earthquake disasters by introducing a model to improve disaster resilience. We developed two scheduling methods: one, a single-objective optimization that prioritizes only road restoration, and second, a multi-objective optimization that considers different restoration objectives, such as road restoration and goods transportation, simultaneously. 2) We implemented and deployed the support system for formulating earthquake restoration strategies as a web application. 3) We developed municipal-level road network restoration plans for a model area in Kagawa Prefecture in the Nankai megathrust earthquake. The results indicated that the prioritization of municipal-level roads is important for the construction workers to access to state-designated roads in the existing wide-area restoration plan or for residents in the affected areas to resume their daily lives.

研究分野：情報学

キーワード：レジリエンス 最適化 道路ネットワーク 合意形成 地震

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

首都直下地震や南海トラフ巨大地震などの大規模広域災害に対応するため、防災・危機管理分野では、被害を防ぐ「防災 (Disaster Prevention)」、被害を減らす「減災 (Disaster Reduction)」に加えて、被災から早期に回復する「縮災 (災害レジリエンス: Disaster Resilience)」の概念が提唱されている。

レジリエンスは、擾乱からの回復力や復元力を意味する概念であり、工学分野では、レジリエンスの性質である 4Rs の指標 (Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity) (University at Buffalo, 2006) や、レジリエンスを定量的に評価するモデルである、レジリエンスの三角形 (Bruneau et al., *Earthquake Spectra*, 2003) が提案されてきた。これらの考え方を基に、防災・危機管理分野にレジリエンスの概念を導入するためモデルとして、災害レジリエンス向上モデルが提案されている (林春男, 京都大学防災研究所年報, 2016; 河田恵昭, 消防科学と情報, 2016)。このモデルは、災害レジリエンスの向上を被害抑止と復旧時間の短縮で表し双方の効果による三角形の面積の最小化を災害レジリエンス向上とするモデルである。さらに、各軸の実現要素として 4Rs の指標があげられている。

ただし、研究開始当初の時点では、縮災の概念や災害レジリエンス向上のモデルは提唱されていたが、具体的な社会実装は不十分であった。この課題が解決できれば、防災・危機管理分野におけるレジリエンスの概念の導入効果・意義を示すことに繋がると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、県や市町村の道路管理者、建設業者やライフライン事業者など防災担当者が、震災発生前に道路ネットワークの復旧戦略を検討するための震災復旧戦略検討システムを開発する。これにより、災害レジリエンス向上モデルの社会実装を目指す。

研究代表者らは、南海トラフ巨大地震時の香川地域の防災対策、復旧・復興の対策支援として、2012年5月に行政や地域企業と「香川地域継続検討協議会」を設立し、地域継続計画 (District Continuity Plan: DCP) の策定に取り組んでいる。この中で、研究代表者は、目的や立場が異なる構成員が、被災地域 (市町レベル) の早期復旧という目的で、道路復旧の優先順位を検討する復旧計画策定手法を開発してきた。

上記手法を用いた過去の分析では、道路の新ルート整備による道路復旧日数の短縮効果が、物資搬送や負傷者搬送の改善に繋がることを確認していた。また、物資搬送優先や医療施設優先など、道路復旧班 (建設業) が何を優先するかによって、道路復旧日数は同程度の計画でも、優先対象の復旧率には差がでる場合があることを確認していた。本研究では、こうした復旧戦略の違いによる復旧効果を災害レジリエンスの向上として定量化する。

本研究は、これまで概念が先行してきたレジリエンスの考え方の具体的な社会実装に取り組む。本研究により、防災・危機管理対策の効果を災害レジリエンスの向上という観点から定量的に評価できれば、震災時の多様な復旧戦略が比較・評価・検証が可能になり、効果的な被害低減対策への活用が期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の3つの研究項目を実施する。研究期間は3年間の予定であったが、当初計画の遅延のため、研究期間を1年間延長した。

- 1) 研究代表者が開発する道路ネットワーク復旧計画策定手法に災害レジリエンス向上モデルを導入することで、異なる復旧戦略が道路復旧計画に与える影響を定量的に評価する手法を開発する。また、開発した復旧計画策定手法を用いて、南海トラフ巨大地震で想定される代表的な被災パターンにおける復旧計画を策定しデータベースに蓄積する。ここで策定した復旧計画は、研究項目2)と3)を実施する際の基本戦略として使用する。
- 2) 1)で開発した手法を活用して、県や市町村の道路管理者、建設業者やライフライン事業者など防災担当者が、災害発生前に道路復旧戦略を検討するWebシステム (震災復旧戦略検討システム)を開発する。本研究で開発するシステムは、最終的にはインターネット上で公開・運用し、広く活用できるようにする。
- 3) 震災復旧戦略検討システムを活用し、災害直後の応急復旧期 (2週間程度) の復旧戦略を検討する。具体的な検討例を通じて、本研究の有用性を検証する。

### 4. 研究成果

- (1) 災害レジリエンス向上モデルを導入した道路ネットワーク復旧計画策定手法の開発  
災害レジリエンスの定量化

レジリエンスの定量化に関する国内外の文献を調査し、評価手法別に分類・整理した。レジリエンスを定量的に評価する研究はいくつか実施されているが、本研究では、評価項目を得点化する網羅性評価、レジリエンスの三角形に基づく評価、動的システムの時間変化に基づく評価、ネットワークの構造に基づく評価に分類した。

次に、本研究の対象である道路ネットワーク復旧計画策定手法に災害レジリエンス向上モデルを導入する方法として、レジリエンスの三角形による評価方法と、ネットワークの構造に基づく評価方法を検討した。

その結果、レジリエンスの三角形に基づく評価を道路ネットワーク復旧計画の策定に導入する方針を決定した。レジリエンスの三角形は、システムの性能を縦軸、時間を横軸に表し、システムの性能低下から回復に至るグラフの面積をレジリエンスとして定量化する（図1参照）。性能低下から平常時への回復が早くなればなるほどグラフの面積（図1中のRの面積）が小さくなり、高いレジリエンスが発揮されると評価する。

また、グラフ理論を基礎としたネットワークの構造に基づく評価に関する視点として、脆弱性や移動効率の点から道路ネットワークの構造を評価する方法も検討した。

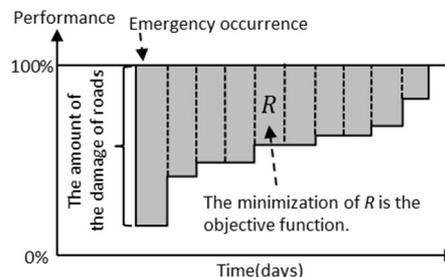


図1 災害レジリエンス向上の定量化

### 道路ネットワーク復旧計画策定手法の改良

後述する(3)の対象地域において、従来と同じ分析条件で復旧計画策定を実施したところ、道路被害数が多い場合、現状のアルゴリズムでは計画策定ができない場合が生じた。研究代表者が開発する道路ネットワーク復旧計画策定手法は、遺伝的アルゴリズムを用いて、復旧班の被害箇所の担当と復旧順序の組み合わせを最適化している。従来手法では、初期解としてランダムに生成した復旧計画からよりよい組み合わせを探索しているが、道路被害数が多い場合、ランダムに生成した復旧計画が実行可能な計画とならず、計画策定が進まなかった。このため、最短経路探索を用いて初期解として実行可能な計画を生成し、その計画からよりよい組み合わせを探索する手法に改良した。

### (2) 震災復旧戦略検討システムの開発

震災復旧戦略検討システムとして、次の1) GIS上で分析に必要なデータ作成を支援する機能と、2) 分析条件や策定した計画をWeb地図上で可視化する機能を開発した。

1) のデータ作成支援機能はオープンソースのGISであるQGISのプラグイン機能として開発した（図2参照）。データ作成支援機能は、QGIS上でノードとリンクからなる道路ネットワークの作成を支援する。また、ノード上に復旧班、リンク上に道路被害など、分析に必要な情報を属性情報として追加することも支援をする。作成した分析条件はGeoJSONおよびCSV形式で出力できる。

データ作成支援機能で作成したGeoJSON形式のファイルを用いて(1)の道路ネットワーク復旧計画策定エンジンで読み込み、遺伝的アルゴリズムによる復旧計画策定を実施する。道路復旧計画策定エンジンは、読み込んだGeoJSON形式のファイルのリンク属性に復旧完了日数を追加する。

2) の可視化機能はオープンソースのWebGIS(iTowns)を用いてWebシステムとして開発した（図3参照）。可視化機能では、GeoJSONファイルを読み込み、Web地図上に道路ネットワークを可視化する。また、復旧日数に応じてリンクを色付けて表示し、被害道路が何日目までに復旧完了するかを確認できる。

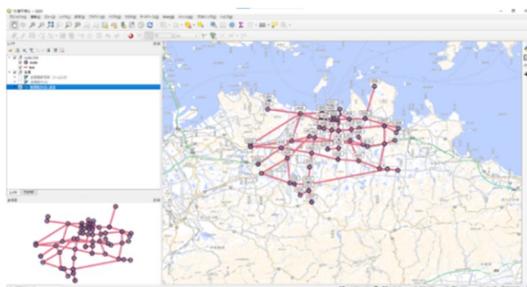


図2 入力支援機能

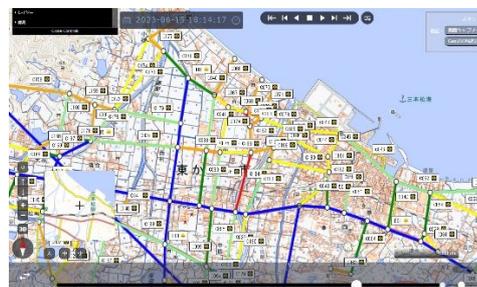


図3 計画可視化機能

### (3) 香川県東かがわ市を対象としたケーススタディの実施

#### 分析目的

南海トラフ巨大地震に対して、四国では県境をまたぐ広域的な「四国広域道路啓開計画」が策定され、優先的に啓開する道路が指定されている。さらに、この計画を受けて、四国の各県では、香川県道路啓開計画や徳島県道路啓開計画など県域規模での道路啓開計画が策定されている。

これら既存の計画は、災害時の復旧活動の全体方針を示しており、特に重要な国道や県道が対象である。しかし、被災地域の早期復旧を図る上では、地域内の建設業が上記計画の指定道路まで進出するための道路の確保や、被災地の地域住民が日常生活道路の考慮も必要である。既存の道路啓開計画が有効に機能するには、市町村域規模の道路啓開計画の具体化が必要であるが、現時点ではこうした計画の策定が進んでいない。

本分析では、南海トラフ巨大地震における市町村規模の地域の啓開計画策定を検討する。対象



開と物資搬送の2目的による計画策定を実施した。目的関数1はa)と同様である。目的関数2は二次物資拠点と避難所間の接続を評価する。対象地域内には、二次物資拠点である市役所1か所と物資搬送先の避難所19か所(近傍ノードに振り分けると重複箇所があり分析上は14か所)がある。目的関数2は、図1の縦軸を二次物資拠点-避難所間の到達数の割合、横軸を復旧時間とする。したがって、目的関数2は二次物資拠点-避難所間の累積非到達率の最小化となる。

2目的復旧計画策定では、道路復旧を優先するか、物資搬送を優先するかによって、いくつかの解候補が存在する。本分析で求めた解候補を図6に示す。図6中の各点が1つの復旧計画を表す。図6中の「基本計画」はa)の道路復旧のみを考慮した計画である。それ以外の点は2目的復旧計画策定で求めた解候補である。解候補の中で道路復旧を最優先する計画を「計画A」、物資搬送を最優先する計画を「計画B」、物資搬送と道路復旧を同程度優先する計画を「計画C」とする。図6の縦軸は道路復旧の目的関数値、横軸は物資搬送の目的関数値を表す。いずれの目的関数値も小さいほど良く(図1のRに相当)、それぞれ、早期に道路被害を復旧する計画、早期に二次物資拠点と避難所間が接続可能となる計画を表す。また、基本計画および計画A~Cの道路啓開率と避難所到達数の回復グラフを図7に示す。

図6より、道路復旧の軸では目的関数値が約15~20の範囲に計画が分布している。これは啓開完了日数6~7日の範囲であり、1日程度の差を表す。物資搬送の目的関数値は約1.2~4.7の範囲に分布している。これは啓開2日目終了時点で到達可能な避難所数が6~12施設の差を表す。図7の道路啓開率のグラフより、道路復旧の視点では計画B以外は同程度の道路啓開を経ることが確認できる。一方、図7の避難所到達数のグラフより、基本計画は道路復旧が最も早い、物資搬送を考慮していないため、物資搬送が最も遅くなっていることが確認できる。図8に基本計画と計画Aの道路啓開日数の地図上への可視化結果を示す。基本計画と比べて、計画Aは図8中の赤枠の道路の啓開を早期に実施するように変化している。

本計画の中からどの優先をするかは意思決定者に委ねられる。たとえば、基本計画と比べても計画Aや計画Cは道路復旧全体の遅延はあまりないため、計画Aや計画Cを選択し二次物資拠点と避難所間の物資搬送を同時に実施することが考えられる。また、4~5日目の道路復旧を遅らせても市内の物資搬送を特に優先したい場合は計画Bや計画Cを選択することが考えられる。

### c) まとめ

本分析では、香川県道路啓開計画をベースに市内の道路の啓開(復旧)も同時に考慮した啓開計画の策定を検討した。分析の結果、1次優先~2次優先以外の道路について、市町としての啓開(復旧)目的を設定することの重要性が確認できた。本分析では道路啓開と避難所への物資搬送の2目的を考慮したが、たとえば、人口の多いエリアと医療施設の接続、がれき集積地へのがれき搬送など、他の目的を考慮することも考えられる。対象地域内では、香川県道路啓開計画の指定道路の啓開と同時に、地域内の優先順位を設定し並行して啓開することが、被災からのしなやか(レジリエント)な復旧に繋がると考えられる。

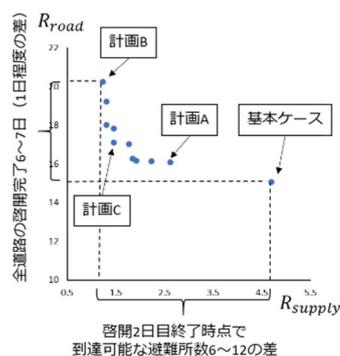


図6 2目的計画の解候補

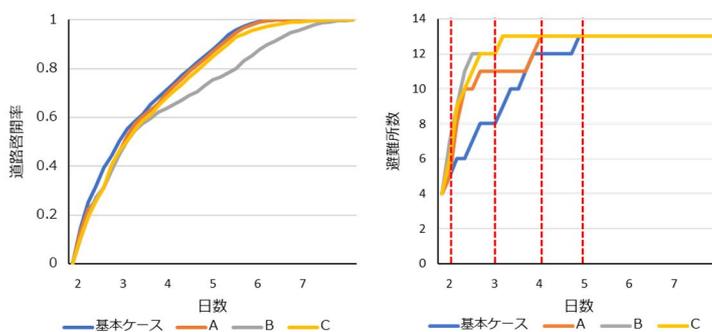


図7 道路啓開率と避難所到達数の回復グラフ

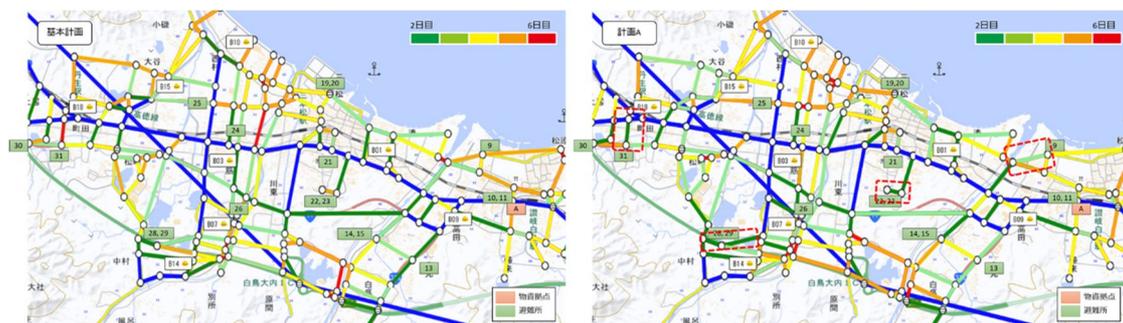


図8 基本計画と計画Aの道路啓開日数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 井面仁志, 高橋亨輔	4. 巻 19
2. 論文標題 災害レジリエンスを考慮した被災時道路啓開計画の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 感性工学	6. 最初と最後の頁 123-128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5057/kansei.19.3_123	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高橋亨輔, 白木渡, 井面仁志	4. 巻 -
2. 論文標題 道路復旧計画策定問題への災害レジリエンスモデルの導入	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第9回構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウム (JCROSSAR 2019) 論文集	6. 最初と最後の頁 81-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 白木渡, 石野紗衣, 泉田数佳, 土居峰, 井面仁志, 高橋亨輔	4. 巻 75
2. 論文標題 レジリエンスの観点による想定外災害時の避難所運営の課題と対応策の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集F6 (安全問題)	6. 最初と最後の頁 I_237-I_246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsp.75.2_I_237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋亨輔, 井面仁志, 白木渡, 小笠原誠, 小倉晃一
2. 発表標題 レジリエントな地域復旧を目指した大規模地震災害時における地域啓開シミュレーション
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋亨輔
2. 発表標題 グラフ理論を用いた道路ネットワークの評価と物資拠点に関する分析
3. 学会等名 日本材料学会第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋亨輔, 井面仁志, 要田侑輝
2. 発表標題 グラフ理論に基づく香川県緊急輸送道路ネットワークの構造分析
3. 学会等名 土木学会安全問題討論会'20
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂根早磨, 高橋亨輔, 井面仁志, 白木渡
2. 発表標題 DIA支援システムを活用した南海トラフ地震における地域啓開計画策定に関する検討
3. 学会等名 日本材料学会第32回信頼性シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahashi, K., Shiraki, W. and Inomo, H.
2. 発表標題 Evaluation and Analysis of Disaster Resilience in Relation to the Scheduling of Road Network Restoration
3. 学会等名 Proc. of the 10th Conference of the International Society for Integrated Disaster Risk Management (IDRiM) 2019, Poster presentation (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

- 1) 震災復旧戦略検討システム : <https://kt6lab.github.io/>  
2) 土木学会四国支部 香川地域技術賞 (本研究課題で開発したシステムを用いたケーススタディの表彰) <http://www.jsce7.jp/kizi/20230601c.pdf>

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	井面 仁志  (Inomo Hitoshi)  (90294735)	香川大学・創造工学部・教授    (16201)	
研究協力者	白木 渡  (Shiraki Wataru)  (30032288)	香川大学・四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構・名誉教授    (16201)	
研究協力者	要田 侑輝  (Kanameda Yuki)	香川大学大学院・工学研究科・学生    (16201)	
研究協力者	坂根 早磨  (Sakane Soma)	香川大学大学院・工学研究科・学生    (16201)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------