

| | |
|--------------|---|
| Title | Fiedler ベクトルを用いた能登地区道路ネットワークの脆弱性分析 — ハザードマップおよび令和6年能登半島地震被災域との比較 — |
| Author(s) | 小池, 和弘 |
| Citation | |
| Issue Date | 2026-03 |
| Type | Thesis or Dissertation |
| Text version | author |
| URL | https://hdl.handle.net/10119/20482 |
| Rights | |
| Description | Supervisor:林 幸雄, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学) |

修士論文

Fiedler ベクトルを用いた能登地区道路ネットワークの脆弱性分析
— ハザードマップおよび令和 6 年能登半島地震被災域との比較 —

小池 和弘

主指導教員 林 幸雄

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術専攻
(知識科学)

令和 8 年 3 月

Abstract

Road networks in peninsular regions often exhibit low structural redundancy due to strong geographical constraints. Consequently, the disruption of a limited number of critical road segments can significantly degrade overall network connectivity and accessibility, making such regions particularly vulnerable to large-scale natural disasters.

This study applies a structural vulnerability assessment framework based on the second smallest eigenvalue of the graph Laplacian (λ_2) and its corresponding eigenvector (Fiedler vector) to the road network of the Noto Peninsula region in Japan. The road network is modeled as a weighted, undirected graph, where link weights are defined as the inverse of road length. Global network connectivity is evaluated using λ_2 , while link-level vulnerability is quantified using the absolute differences of Fiedler vector components between adjacent nodes.

To examine the relationship between structural vulnerability and disaster impacts, hazard maps provided by the Geospatial Information Authority of Japan, including landslide and tsunami hazard zones, are spatially overlaid on the road network to identify road segments with potential disruption risk. Furthermore, actual landslide and tsunami inundation data from the 2024 Noto Peninsula Earthquake are used to label observed disrupted road segments. The correspondence between predicted vulnerability patterns and observed damage patterns is quantitatively evaluated using precision and recall metrics.

The results indicate that the proposed framework can identify structurally important road segments that are prone to network fragmentation under disaster conditions. In addition, the spatial distribution of vulnerable segments exhibits hazard-dependent characteristics that reflect regional geographical features such as mountainous terrain and coastal exposure.

Because the proposed framework does not rely on traffic demand data or probabilistic disaster occurrence models, and requires only static road network data, hazard maps, and observed damage records, it can be readily extended to other regions and can support disaster risk assessment and infrastructure planning in geographically constrained areas.

目次

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 第 1 章 | はじめに | 1 |
| 1.1 | 研究背景 | 1 |
| 1.2 | 研究目的 | 3 |
| 1.3 | 本論の構成 | 4 |
| 第 2 章 | 関連研究 | 6 |
| 2.1 | 出発地・目的地 (OD) ペアに基づく交通工学的評価手法 | 6 |
| 2.2 | 確率的崩壊過程を仮定するパーコレーション分析手法 | 7 |
| 2.3 | 固有値解析 (λ_2) に基づく脆弱性評価 | 8 |
| 2.4 | 三つのアプローチの比較 | 11 |
| 第 3 章 | 分析に用いるデータセットと前処理 | 13 |
| 3.1 | 道路データ | 13 |
| 3.2 | ハザードマップデータ | 17 |
| 3.3 | 被災域データ | 20 |
| 3.4 | 分析に用いたツール・ライブラリ | 22 |
| 第 4 章 | 提案手法 | 23 |
| 4.1 | 脆弱度評価の基本的考え方 | 23 |
| 4.2 | 平常時の道路ネットワーク脆弱度評価 | 26 |
| 4.3 | 災害時を考慮した道路ネットワーク脆弱度評価 | 29 |
| 4.4 | 脆弱度評価および災害影響シミュレーションの実装 | 31 |
| 4.5 | 脆弱度の可視化手法 | 33 |
| 第 5 章 | 実験・評価 | 36 |
| 5.1 | 評価指標の定義 | 36 |

| | | |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| 5.2 | ハザードマップとの比較結果 | 40 |
| 5.3 | 実災害データとの比較結果 | 44 |
| 5.4 | 道路種別・災害種別・市町別の再現率・適合率の比較 | 48 |
| 5.5 | まとめと考察 | 53 |
| 5.6 | 限界と今後の課題 | 54 |
| 第 6 章 | おわりに | 56 |
| | 謝辞 | 58 |
| | 参考文献 | 59 |
| 付録 A | 詳細なデータ | 62 |
| A.1 | 道路データ | 62 |
| A.2 | ハザードマップ | 67 |
| A.3 | 令和 6 年能登半島地震の実災害データ | 77 |
| 付録 B | 実験結果の詳細なデータ | 79 |
| B.1 | 脆弱度平均値の 2 倍を閾値とした場合 | 79 |
| B.2 | 脆弱度平均値の 5 倍を閾値とした場合 | 84 |
| 付録 C | ソースコード | 88 |
| C.1 | 道路ネットワーク構築処理 | 88 |
| C.2 | ハザードマップ・タイル取得処理 | 89 |
| C.3 | ラスタタイル結合および GeoTIFF 生成処理 | 89 |
| C.4 | 災害影響道路区間抽出処理 | 90 |
| C.5 | 道路ネットワークのラプラシアン行列計算 | 90 |
| C.6 | 災害シナリオに基づく連結性再評価処理 | 91 |
| 付録 D | 実行環境構築 | 92 |
| D.1 | Mac: Docker | 92 |
| D.2 | KAGAYAKI: Singularity | 93 |
| D.3 | 全体フロー図 | 94 |

目次

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | 支援物資の流れ・ラストマイル (出典：『国土交通省 ラストマイルにおける支援物資輸送・拠点開設・運営ハンドブック』を加工) | 2 |
| 1.2 | 令和6年能登半島地震における広域物資輸送拠点と地域内輸送拠点 | 3 |
| 2.1 | ネットワーク図 | 9 |
| 2.2 | ネットワークの各ノードの第二最小固有ベクトル成分値 | 10 |
| 3.1 | 国土交通省 国土数値情報の緊急輸送道路 (青線) の例 (石川県と富山県の一部抜粋) | 14 |
| 3.2 | OpenStreetMap の道路 (青線) の例 (石川県と富山県の一部抜粋) | 15 |
| 3.3 | 土砂災害警戒区域 (急傾斜地の崩壊) | 18 |
| 3.4 | 津波浸水想定区域 | 19 |
| 3.5 | 斜面崩壊・堆積分布データ | 21 |
| 3.6 | 空中写真判読による津波浸水域 (推定) | 21 |
| 4.1 | 地形制約に起因する脆弱度と災害による道路寸断影響との整合関係 | 25 |
| 4.2 | 平常時の緊急輸送道路ネットワークの脆弱度分布 (珠洲市) | 27 |
| 4.3 | 平常時の OSM 道路ネットワークの脆弱度分布 (珠洲市) | 28 |
| 4.4 | 緊急輸送道路と土砂災害ハザードマップの重なり (珠洲市) | 29 |
| 4.5 | OSM 道路と土砂災害ハザードマップの重なり (珠洲市) | 30 |
| 4.6 | 緊急輸送道路と土砂災害ハザードマップの実験結果 (珠洲市) | 34 |
| 4.7 | OSM 道路と土砂災害ハザードマップの実験結果 (珠洲市) | 34 |
| 5.1 | 適合率・再現率の定義 | 37 |
| 5.2 | 緊急輸送道路の脆弱度の分布 | 38 |
| 5.3 | OSM 道路の脆弱度の分布 | 39 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.4 | 緊急輸送道路と土砂災害ハザードマップの重なりによる寸断判定結果 . . . | 41 |
| 5.5 | 緊急輸送道路と津波浸水ハザードマップの重なりによる寸断判定結果 . . . | 42 |
| 5.6 | OSM 道路と土砂災害ハザードマップの重なりによる寸断判定結果 | 42 |
| 5.7 | OSM 道路と津波浸水ハザードマップの重なりによる寸断判定結果 | 43 |
| 5.8 | 緊急輸送道路と実災害での斜面崩壊・堆積分布の重なりによる寸断判定 結果 | 45 |
| 5.9 | 緊急輸送道路と実災害での津波浸水域の重なりによる寸断判定結果 | 46 |
| 5.10 | OSM 道路と実災害での斜面崩壊・堆積分布の重なりによる寸断判定結果 | 46 |
| 5.11 | OSM 道路と実災害での津波浸水域の重なりによる寸断判定結果 | 47 |
| 5.12 | ハザードマップに基づく適合率（閾値：脆弱度平均値の3倍） | 48 |
| 5.13 | ハザードマップに基づく再現率（閾値：脆弱度平均値の3倍） | 50 |
| 5.14 | 実災害データに基づく適合率（閾値：脆弱度平均値の3倍） | 51 |
| 5.15 | 実災害データに基づく再現率（閾値：脆弱度平均値の3倍） | 52 |
| | | |
| A.1 | 緊急輸送道路 | 63 |
| A.2 | 重要物流道路 | 64 |
| A.3 | 半島循環道路 | 64 |
| A.4 | OpenStreetMap の道路 | 66 |
| A.5 | 土砂災害警戒区域（土石流） | 68 |
| A.6 | 土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊） | 69 |
| A.7 | 土砂災害警戒区域（地すべり） | 70 |
| A.8 | 洪水浸水想定区域（想定最大規模） | 71 |
| A.9 | 洪水浸水想定区域（計画規模） | 71 |
| A.10 | 浸水継続時間（想定最大規模） | 72 |
| A.11 | 家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流） | 73 |
| A.12 | 家屋倒壊等氾濫想定区域（河岸侵食） | 74 |
| A.13 | 内水（雨水出水）浸水想定区域 | 75 |
| A.14 | 雪崩危険箇所 | 76 |
| A.15 | 津波浸水想定区域 | 76 |
| A.16 | 斜面崩壊・堆積分布 | 77 |
| A.17 | 空中写真判読による津波浸水域（推定） | 78 |
| | | |
| B.1 | ハザードマップに基づく適合率（閾値：脆弱度平均値の2倍） | 79 |

| | | |
|-----|---|----|
| B.2 | ハザードマップに基づく再現率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍) | 81 |
| B.3 | 実災害データに基づく適合率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍) | 82 |
| B.4 | 実災害データに基づく再現率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍) | 83 |
| B.5 | ハザードマップに基づく適合率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値) | 84 |
| B.6 | ハザードマップに基づく再現率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値) | 85 |
| B.7 | 実災害データに基づく適合率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値) | 86 |
| B.8 | 実災害データに基づく再現率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値) | 87 |
| D.1 | 全体フロー図 | 95 |

表目次

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | 半島振興対策実施地域と全国の比較（出典：『国土交通省 半島地域の活性化に資する施策の推進』を加工） | 2 |
| 2.1 | 関連研究における三つのアプローチの比較 | 12 |
| 3.1 | 災害と関連が強いハザードマップの種類 | 17 |
| 4.1 | 図中表示スタイルの凡例および脆弱度判定閾値 | 27 |
| 4.2 | 図中表示スタイルの凡例および脆弱度判定閾値 | 33 |
| 5.1 | 道路種別およびハザードマップ災害種別ごとの脆弱度判定と寸断判定の集計結果 | 40 |
| 5.2 | 図中表示スタイルの凡例および脆弱度判定閾値 | 40 |
| 5.3 | 道路種別および実災害種別ごとの脆弱度判定と寸断判定の集計結果 | 44 |
| 5.4 | ハザードマップに基づく適合率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 3 倍） | 49 |
| 5.5 | ハザードマップに基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 3 倍） | 50 |
| 5.6 | 実災害に基づく適合率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 3 倍） | 51 |
| 5.7 | 実災害に基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 3 倍） | 52 |
| A.1 | QuickOSM で取得した OSM 道路データの抽出条件（highway タグ） | 66 |
| B.1 | ハザードマップに基づく適合率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 2 倍） | 80 |
| B.2 | ハザードマップに基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 2 倍） | 81 |
| B.3 | 実災害に基づく適合率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 2 倍） | 82 |
| B.4 | 実災害に基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 2 倍） | 83 |
| B.5 | ハザードマップに基づく適合率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 5 倍） | 84 |
| B.6 | ハザードマップに基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の 5 倍） | 85 |

| | | |
|-----|---|----|
| B.7 | 実災害に基づく適合率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 5 倍) | 86 |
| B.8 | 実災害に基づく再現率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 5 倍) | 87 |

第1章

はじめに

1.1 研究背景

大規模自然災害の発生時には、直接的な被害に加え、救助・医療・物資輸送の遅延等によって生じる災害関連死をいかに抑制するかが重要な課題となる。地理的条件により都市部からのアクセスが限定される半島地域では、災害発生後の初動対応や継続的支援の遅れが顕在化しやすい。半島地域は、表 1.1 に示す通り、日本の国土面積の 11.1% を占め、国土の保全、食料の安定供給、独自の文化の継承など、日本全体にとって重要な役割を担っている [1]。国土交通省が所管する半島振興法に基づき指定される「半島振興対策実施地域」は、地理的に三方を海に囲まれた半島形状を有するとともに、一体として総合的な振興施策を講ずることが適当と認められた地域であり、全国 22 道府県・194 市町村にまたがる 23 地域が指定されている。平常時においても多くの半島地域では、全国平均と比較して人口減少や高齢化が進行しており、地域内の相互扶助機能の低下や社会資本ストックの老朽化が懸念されている。そこに大規模災害という外部ショックが加わることで、地域からの人口流出が急激に加速する可能性が指摘されており、国土の保全機能や食料安全保障の脆弱化、さらには地域固有の文化的多様性の喪失といった社会的影響が日本全体に波及するおそれがある。

このような背景のもと、交通インフラ、特に道路ネットワークは、平常時および災害時の双方において極めて重要な役割を果たす。平常時には、医療機関や雇用機会へのアクセスを通じて生活環境の向上や地域経済の維持を支える基盤として機能する。こうした平常時の機能は、災害発生時においても被災地への支援活動を支える基盤となり、図 1.1 に示す通り、都道府県レベルの広域物資輸送拠点から市区町村レベルの地域内輸送拠点、および避難所への経路 (ラストマイル)[2] の確保が、支援物資輸送における初動対応と継続的

表 1.1: 半島振興対策実施地域と全国の比較（出典：『国土交通省 半島地域の活性化に資する施策の推進』を加工）

| 指標 | 半島地域 | 全国 | 備考 |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 面積 | 4.2 万 km ² | 37.8 万 km ² | 全国総面積の 11.1% |
| 人口 | 377 万人 | 1 億 2615 万人 | 全国総人口の 3.0% (2020 年) |
| 人口減少率 | -7.0% | -0.7% | 2015 年～2020 年の比較 |
| 高齢化率 | 38.0% | 29.0% | 65 歳以上人口比率 (2020 年) |
| 漁港数 | 871 港 | 2,777 港 | 半島が占める割合 31% (2023 年) |
| みなとオアシス登録数 | 33 箇所 | 169 箇所 | 半島が占める割合 20% (2025 年) |

支援の成否を大きく左右する。

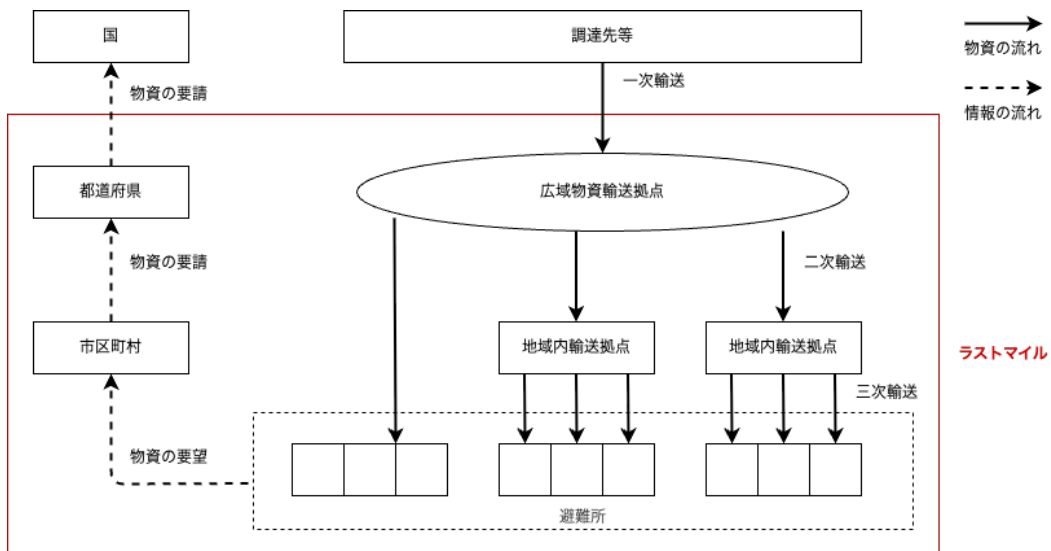


図 1.1: 支援物資の流れ・ラストマイル（出典：『国土交通省 ラストマイルにおける支援物資輸送・拠点開設・運営ハンドブック』を加工）

令和 6 年能登半島地震 (2024 年) の際には、図 1.2 に示す通り、国や自治体は、金沢市の石川県産業展示館を広域物資輸送拠点とし、図中にオレンジの点で示した地域内輸送拠点 [3] への道路確保を最優先課題と位置付け、災害発生直後から道路啓開活動を展開した。能登半島地震における道路網被害と交通実態については、土木計画学研究委員会の報告資料にまとめられている [4]。

一方で、災害発生時において、どの道路がネットワーク全体の連結性を支え、どの道路の機能低下が広域的な交通断絶や地域の孤立につながりやすいのかを、事前に定量的に把



図 1.2: 令和 6 年能登半島地震における広域物資輸送拠点と地域内輸送拠点

握することは容易ではない。特に、半島地域のように地形的制約が大きく、代替経路が限られる道路構造を有する地域では、平常時のネットワーク構造そのものが災害時の影響の受け方に大きく関係すると思われる。

近年の研究では、道路ネットワークのロバスト性やアクセシビリティ評価、さらにはハザード情報を用いたリスク評価など、災害時の交通インフラを多角的に捉える試みが進められてきた。これらの研究は、広域的なネットワーク構造が災害時の交通機能維持に与える影響を明らかにする上で重要な知見を提供している。一方で、地域内部の道路構造に着目し、平常時のネットワーク構造に内在する特性と、災害時の孤立や道路寸断リスク(通行不能化)との関係を体系的に整理する枠組みは、実務的観点からもさらなる検討の余地がある。

1.2 研究目的

平常時の道路ネットワーク構造に内在する特性は、集落の配置や交通需要、とりわけ地形的制約の影響を受けて形成されてきた道路配置の結果であり、こうした形成過程が災害時の被災分布との対応関係を生み出す要因の一つであると考えられる。特に地形条件の制

約が大きい半島地域では、道路ネットワークの構造的特性が、平常時のみならず災害時の道路寸断リスクとも密接に関係していると考えられる。

本研究では、「平常時に構造的に脆弱な道路は、災害時においても寸断されやすい道路と、一定の対応関係を有する」という仮説を立て、その妥当性を検証することを目的とする。

具体的には、複雑ネットワーク科学に基づく Fiedler ベクトルを用いた既存の評価手法を適用し、平常時の道路ネットワークに内在する構造的特性を定量化するとともに、それが災害時の道路寸断リスクとどのように関係するかを分析する枠組みを構築する。さらに、構築した手法を能登半島の道路ネットワークに適用し、ハザードマップおよび令和6年能登半島地震(2024年)の被災域との比較分析を行う。この比較分析においては、構造的脆弱性指標に基づいて抽出された道路区間と、ハザードマップおよび実被災域との空間的重なりを、適合率(precision)および再現率(recall)を用いて定量的に評価する。これにより、能登半島をはじめとする半島地域の防災計画の高度化に寄与するとともに、他地域への適用可能性についても検討する。

ここでの分析枠組みは、Fiedler ベクトルに基づく評価手法を中核として構成される。本研究により、交通量データなどの詳細な利用実態情報が得られない場合においても、道路ネットワークのトポロジー情報とハザードマップなどの公開データを用いることで、災害時に孤立を招きやすい道路区間を事前に推定可能とする再現性の高い分析枠組みの有効性を示すことを目指す。

1.3 本論の構成

本研究は、半島地域に特有の道路ネットワーク構造に着目し、平常時の構造的特性と災害時の寸断リスクとの関係を定量的に評価する枠組みを構築することを目的として構成されている。本論は以下の構成で展開する。

第2章では、道路ネットワークの脆弱性評価に関する既存研究として、出発地・目的地(OD)ペアに基づく交通工学的評価手法、パーコレーション分析手法、および固有値解析に基づく手法を整理し、本研究の位置づけを明確にする。第3章では、研究対象地域の概要および使用する道路ネットワークデータ、ハザードマップなどのオープンデータの内容と前処理手法について説明する。第4章では、本研究で構築する分析枠組みの理論的背景として、Fiedler ベクトルに基づく道路ネットワーク脆弱性評価手法および解析アルゴリズムを示す。第5章では、能登半島を対象として評価枠組みを適用し、平常時の構造的脆弱性評価結果と災害時被災分布との対応関係について分析する。さらに、結果の解釈(考

察)と、適用上の限界および今後の課題について整理する。最後に第6章で、本研究の成果を総括し、今後の研究課題を示す。

第2章

関連研究

道路ネットワークの脆弱性評価は、災害や事故による道路寸断が「どの程度ネットワーク機能を低下させるか」を定量化する問題である。ここでは代表的な三つのアプローチとして、出発地・目的地（OD）ペアに基づく交通工学的評価手法、パーコレーション分析手法、および固有値解析に基づく手法を紹介する。なお、本研究では、道路ネットワークをグラフ $G = (V, E)$ として表現し、 V をノード（頂点）集合、 E をリンク（辺）集合とする。

2.1 出発地・目的地（OD）ペアに基づく交通工学的評価手法

従来交通工学的アプローチでは、OD ペアを設定し、各 OD に対して複数経路の冗長性（例：非交差経路数）や、到達しやすさ（アクセシビリティ）を、所要時間や一般化費用の増分として評価する方法が広く用いられてきた。この枠組みは、道路ネットワークの機能を「移動の容易さ」として定量化し、リンク（あるいはノード）の寸断が OD 間の最短経路（または均衡配分後の経路集合）にもたらす影響を、所要時間・距離・一般化費用の増加として評価するものである。

代表的な研究として、Jenelius ら [5] は、道路ネットワークにおけるリンクおよびノードの脆弱性を、「重要度 (importance)」と「曝露度 (exposure)」という二つの指標として定量化する枠組みを提案している。同研究では、あるリンクが閉塞した際に生じる全 OD ペアの総旅行時間（または一般化費用）の増加量をリンク重要度として定義し、ネットワーク機能への影響度を評価している。また、特定地点が他リンクの閉塞によって受ける影響の大きさを曝露度として定義し、被害を受けやすい地点の空間的分布を評価可能としている。この手法は、OD ベースの脆弱性評価を体系化した点に意義がある一方、OD

需要設定や交通配分モデルに依存し、大規模ネットワークへの適用では計算負荷が増大するという課題を有する。

さらに発展的な研究として、Chen ら [6] は、道路ネットワークの脆弱性を「アクセシビリティの低下」として定量化する枠組みを提案している。同研究では、経路選択に加えて、交通手段選択、目的地選択、旅行実施の有無といった利用者行動の適応を統合的に扱う需要モデルを構築し、ランダム効用理論に基づくアクセシビリティ指標を用いて、ネットワーク劣化時の機能低下を評価している。この手法は、災害時の行動変化を考慮できる点で現実的である一方、OD 需要設定や行動モデルの仮定に依存し、対象規模の拡大に伴って計算負荷が増大するという課題を有する。

これらの OD ペアに基づくアプローチの利点は、評価量が「移動時間の損失」など利用者視点の解釈に直結しやすい点にある。一方で、広域ネットワークを対象とする場合、OD ペア数の増加に伴い、リンク閉塞シナリオ×OD ペア×経路探索（あるいは配分計算）が大規模化しやすい。また、評価結果は OD の設定（需要分布）や交通モデルの仮定に依存し、災害時における需要変動の不確実性が評価結果に影響し得る。

2.2 確率的崩壊過程を仮定するパーコレーション分析手法

道路ネットワークの防災性能評価においては、災害の進行に伴ってノードやリンクが段階的に機能を失う過程を、確率的な「除去」としてモデル化するパーコレーション分析が用いられることがある。一般に、ノード占有確率（site percolation）またはリンク生存確率（bond percolation）を変化させ、最大連結成分の規模、孤立発生確率、到達可能領域の縮退などの指標を追跡することで、ネットワークが相転移的に崩壊する臨界点（しきい値）を同定する。この枠組みは、道路閉塞が確率的に発生する状況を想定し、どの程度の閉塞で「大域的な機能喪失」が生じるかを統計的に把握できる点に特徴がある。

日本における初期の研究として、久貝 [7] は、地震時の家屋倒壊による道路閉塞を想定し、地区レベル道路ネットワークの防災性能をパーコレーション理論に基づいて評価する枠組みを示した。同研究では、道路ネットワークを交差点（ノード）と道路区間（リンク）からなるグラフとして表現し、地震動による家屋倒壊が道路閉塞へ与える影響を確率的に取り込むことで、ネットワークの連結性が低下していく過程を分析している。具体的には、交差点の占有確率や道路区間の通行可能性（生存確率）をパラメータとして変化させ、孤立地区の発生確率や、地区全体の到達可能性（連結性）の低下を指標として評価する。このように、災害による閉塞が「どの地点で起きるか」を逐一特定せずとも、閉塞が一定割合に達したときに孤立が急増するような臨界的挙動を捉えられる点が、本枠組みの

利点である。

また、久貝・加藤 [8] は、通行可能確率を一様とみなす単純化を緩和し、リンクごとの通行可能確率分布を考慮した拡張モデルを提示している。これにより、地震時の被害が一様ではなく空間的に偏在する状況を、確率分布として取り込む方向性が示された。

パーコレーション分析に基づくアプローチの利点は、道路ネットワークが段階的に機能を失う過程を統計的に記述し、臨界的な崩壊点（しきい値）を同定できる点にある。一方で、臨界点評価を行うためには、ノード占有確率やリンク生存確率といった確率モデルの設定が必要であり、推定の妥当性は災害種別や地域条件に大きく依存する。本研究の目的は、確率的な臨界点の同定そのものではなく、実際のハザード分布と道路ネットワークの重なりによって生じるネットワーク構造の変化を直接評価することにある。このため、パーコレーション分析は有用な理論的枠組みとして関連研究に位置付けつつ、本研究ではトポロジに基づく構造的指標を用いた評価に主眼を置く。

2.3 固有値解析 (λ_2) に基づく脆弱性評価

固有値解析に基づく手法は、OD 需要や交通配分を前提とせず、道路ネットワークをグラフとして捉えたときのトポロジから、連結性の強さとボトルネックを抽出する点に特徴がある。中山ら [9] は、道路ネットワークの連結性をラプラシアン行列の第二最小固有値 λ_2 （代数的連結度）により定量化し、 λ_2 を最大化する観点から道路ネットワークの最適補強問題を定式化している。また、中南ら [10] は、第二最小固有ベクトル（Fiedler ベクトル）を用いて、緊急輸送道路ネットワークにおけるボトルネック候補リンクを抽出する指標として脆弱度を提案している。これらの先行研究は、交通需要や OD 設定に依存せずに、道路ネットワークの構造に内在する脆弱性や補強優先度を評価できることを示しており、本研究の立場（トポロジに基づく構造的評価）を裏付ける。

本手法は、道路ネットワークをグラフ $G = (V, E)$ とみなし、隣接行列 A と次数行列 D からラプラシアン行列 $L = D - A$ を構成する。このとき、 L の第二最小固有値 λ_2 はネットワーク全体の連結性の強さを表し、 λ_2 が小さいほどネットワークは分断されやすい構造を持つ [11]。一方で、 λ_2 はネットワーク全体の指標であるため、「どこが弱いか」を局所的に把握するには第二最小固有ベクトル $y^{(2)}$ （Fiedler ベクトル）の情報が有用である。

直感的には、 $y^{(2)}$ の成分が近い値を持つノード群は同じ側にまとまりやすく、成分値が大きく異なるノード同士を結ぶリンクは、二つのまとまりをつなぐ境界（橋）として振る

舞う。そこで、隣接するノード i, j に対し、リンク (i, j) の相対的な脆弱度を

$$v_{ij} = \left| y_i^{(2)} - y_j^{(2)} \right|$$

で定義する [10]。 v_{ij} が大きいリンクほど、Fiedler ベクトルが示す分断境界をまたいでおり、そのリンクが寸断された場合にネットワークの連結性が大きく損なわれやすいと解釈できる。本研究ではこの考え方にに基づき、広域ネットワークに対しても比較的計算可能な形でボトルネック候補リンクを抽出し、災害時の寸断リスク評価に用いる。

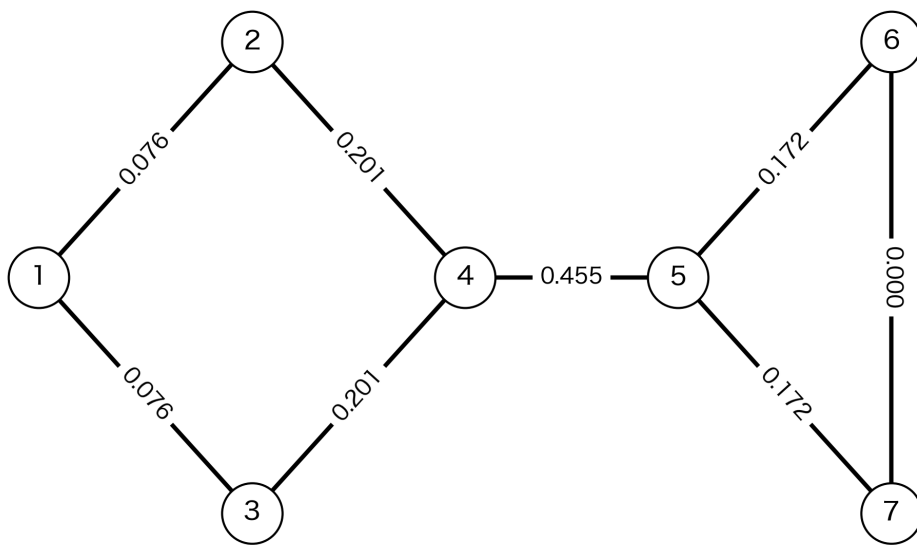


図 2.1: ネットワーク図

図 2.1 は例として用いた小規模ネットワークを示し、図 2.2 は対応する第二最小固有ベクトル成分の分布を示している。両図を合わせて読むと、成分値が負側にまとまるノード群（例：ノード 1-4）と、正側にまとまるノード群（例：ノード 5-7）が存在し、その境界をまたぐリンクほど成分差が大きくなるのが分かる。図 2.2 の赤線矢印はギャップが大きい箇所を示す。本例では、ノード 4 とノード 5 を結ぶリンクの成分差が最大であり、このリンクが寸断されるとネットワークが二つの部分に分断されやすい、すなわちボトルネック候補であることを示唆する。

隣接行列 A 、次数行列 D 、ラプラシアン行列 L の具体例や固有値・固有ベクトルの数値例は以下の通りである。

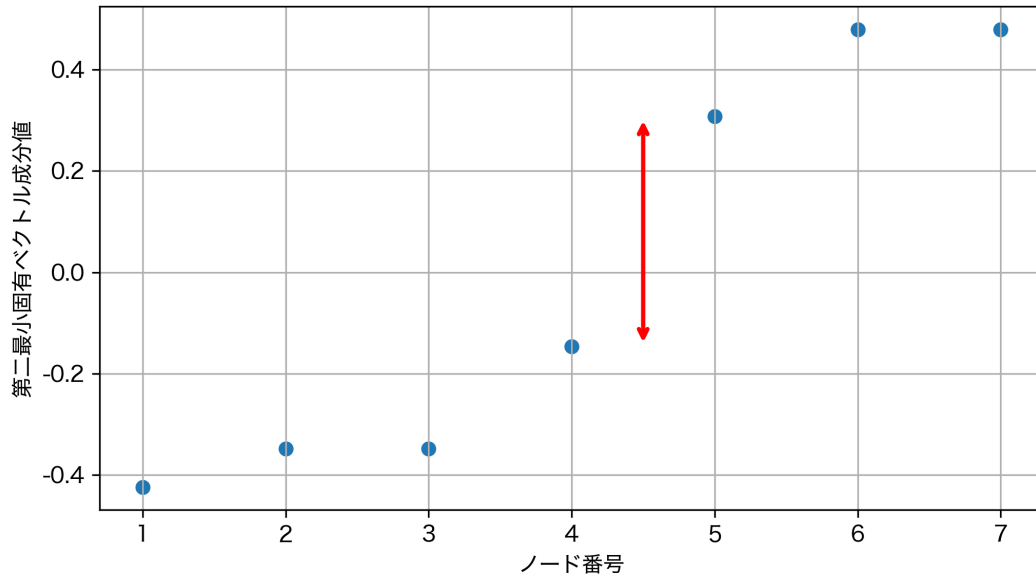


図 2.2: ネットワークの各ノードの第二最小固有ベクトル成分値

- 隣接行列 A

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

- 次数行列 D

$$\begin{bmatrix} 2.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 2.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 2.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 3.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 3.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 2.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 2.0 \end{bmatrix}$$

- ラプラシアン行列 $L = D - A$

$$\begin{bmatrix} 2.0 & -1.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -1.0 & 2.0 & 0.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -1.0 & 0.0 & 2.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -1.0 & -1.0 & 3.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & -1.0 & 3.0 & -1.0 & -1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -1.0 & 2.0 & -1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -1.0 & -1.0 & 2.0 \end{bmatrix}$$

- 固有値・固有ベクトル

- 固有値 λ :

$$[0.0 \quad 0.359 \quad 2.0 \quad 2.276 \quad 3.0 \quad 3.589 \quad 4.776]$$

- 第二最小固有値 λ_2 : 0.359

- 第二最小固有ベクトル $y^{(2)}$:

$$[-0.424 \quad -0.348 \quad -0.348 \quad -0.147 \quad 0.308 \quad 0.48 \quad 0.48]$$

2.4 三つのアプローチの比較

本章で取り上げた三つのアプローチは、いずれも道路ネットワークの脆弱性を評価する枠組みであるが、評価対象（利用者影響、確率的崩壊過程、トポロジに内在する連結性）や必要な仮定（需要・配分モデル、確率モデル、グラフ構造）が異なる。本研究は、ハザードと道路ネットワークの重なりによる構造変化に着目し、OD 設定や需要仮定に依存せずにボトルネック候補を抽出し、災害による連結性低下を一貫した尺度で比較することを目的とする。この位置付けを明確にするため、表 2.1 に、各手法の特徴と限界を整理する。

以上の整理を踏まえ、本研究では、OD 設定を必要とせず、確率モデルに依存せず、広域ネットワークに適用可能な道路ネットワークのトポロジに内在する脆弱性を直接評価できる点を重視し、第二最小固有ベクトル（Fiedler ベクトル）に基づく構造的評価手法を採用する。当該手法を実災害データと直接比較検証した事例は限定的であり、評価結果の妥当性を現実の被災分布と対応付けて確認する枠組みにはなお検討の余地がある。本研究はその点を補完する位置付けにある。

表 2.1: 関連研究における三つのアプローチの比較

| アプローチ | 主な評価量 | 長所 | 適用上の留意点 |
|------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
| 出発地・目的地 (OD) ペア (交通工学) | OD 間の所要時間・一般化費用の増分, アクセシビリティ指標 [5, 6] | 利用者視点の解釈 (時間損失等) に直結しやすい | OD 設定・需要分布・配分モデル仮定に依存. 広域化で計算量が増大しやすい |
| パーコレーション | ノード/リンク生存確率に対する最大連結成分サイズ, 孤立確率, 臨界点 [7] | 段階的な機能喪失と臨界的崩壊点を表現できる | 臨界点評価には確率モデルの設定が必要である |
| λ_2 (固有値解析) | 代数的連結度 λ_2 , Fiedler ベクトルに基づくボトルネック [11, 9, 10] | OD 需要に依存せず構造的脆弱性を抽出. 広域でも比較的計算可能 | 構造指標であり, 時間損失などの交通量的影響を直接は表さない |

第 3 章

分析に用いるデータセットと前処理

3.1 道路データ

本研究では、2 種類の公開道路データを用いた。一つは国土交通省 国土数値情報 [12] が提供する緊急輸送道路データである。緊急輸送道路は、地震などの大規模災害発生時に、避難、救助、物資輸送などの緊急活動を円滑に行うために、事前に国や自治体が指定した重要な幹線道路である。防災拠点（県庁、市役所、病院、空港など）を結び、ネットワークとして機能することが重要視され、沿道の耐震化や電柱の移設などが優先的に進められる。災害対応において優先的に確保・啓開されるべき幹線道路ネットワークを表しており、バックボーンとしての道路ネットワークを提供する (図 3.1)。なお、本研究では災害時の道路機能維持に特に重要な緊急輸送道路データを採用したが、国土交通省 国土数値情報 [12] では他にも用途に応じた各種道路データが提供されている。これらについては、付録 A に概要を記載する。

もう一つは OpenStreetMap (以下 OSM と略す) [13] による道路データである。世界中のボランティアが共同で作成・編集しており、無料で自由に利用できる地理情報データである。「ノード (点)」「ウェイ (線)」「リレーション (関係)」という基本要素と、タグ (属性情報) で構成され、道路の種類、車線数、幅員、歩道情報、バリアフリー情報など、詳細な道路属性を表現できるのが特徴である。住宅街や生活道路を含む高密度な道路ネットワークをカバーしており、実際の人の移動や地域構造を反映したネットワークを表している (図 3.2)。

本研究では、これら用途と性質の異なる 2 種類の道路ネットワークに対して同一のネットワーク解析手法 (ラプラシアン行列と第二最小固有値 λ_2 に基づく脆弱性評価) を適用し、ハザードマップおよび実被災域データと比較した。緊急輸送道路は、災害時の優先的

確保を目的として選定された幹線道路群であり、路線数が限定されているため、寸断が発生した場合には代替経路の冗長性が低く、ボトルネックが形成されやすいという構造的特徴を有する。一方、実際の災害対応においては、緊急輸送道路が通行不能となった場合であっても、一般道路や生活道路を含む既存の道路網を活用して輸送経路の代替が図られることが多い。そこで本研究では、防災計画上で設計されたバックボーンとしての緊急輸送道路ネットワークと、平常時の実利用に近い高密度な道路網を表す OSM 道路ネットワークの双方を対象とすることで、構造的脆弱性評価の結果が道路ネットワークの目的や冗長性の違いによってどのように変化するかを比較した。



図 3.1: 国土交通省 国土数値情報の緊急輸送道路 (青線) の例 (石川県と富山県の一部抜粋)

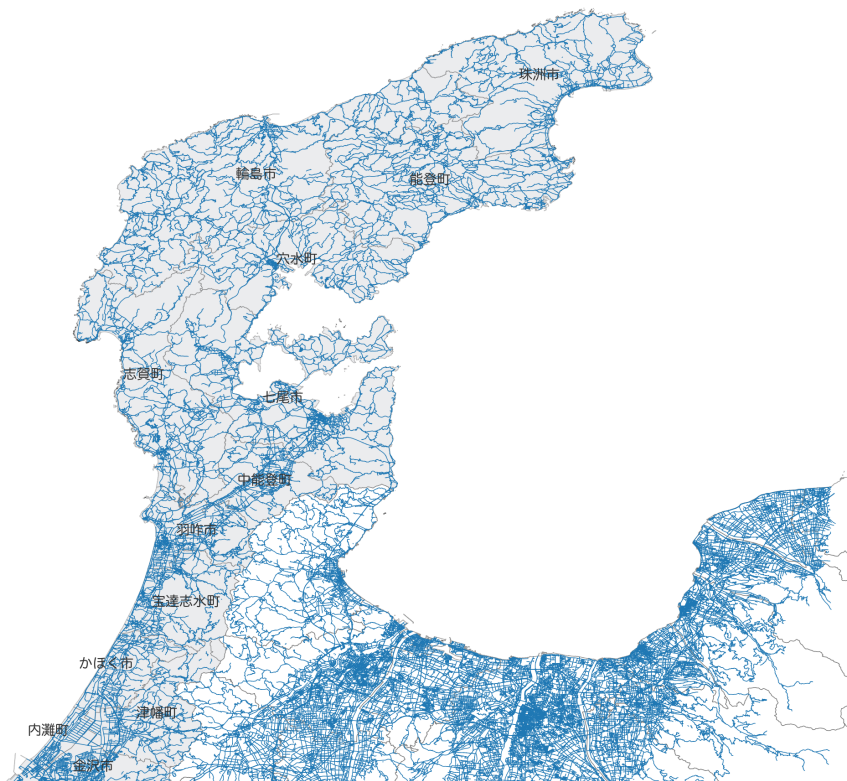


図 3.2: OpenStreetMap の道路 (青線) の例 (石川県と富山県の一部抜粋)

3.1.1 道路ネットワーク構築における前処理

3.1.2 緊急輸送道路の前処理フロー

緊急輸送道路データには国土数値情報から取得したベクタデータを用い、ネットワーク解析に先立って以下の前処理を施した。

1. **端点・交差点の抽出:** 国土数値情報から取得した石川県の緊急輸送道路データ（ベクタ形式）を入力とし、Python により GRASS GIS の v.net connect を用いて道路リンクの端点および交差点を抽出した。これにより、道路（リンク）と端点・交差点（ノード）からなる解析用データを作成した。GRASS GIS については後述する。
2. **最大連結成分の抽出とグラフ化:** 生成したリンク・ノード情報を Python で読み込み、graph-tool を用いてグラフ構造へ変換した。また、孤立した小規模成分の影

響を除外するため、最大連結成分のみを解析対象とした。graph-tool については後述する。

3. λ_2 に基づく脆弱度算出: 最大連結成分に対してラプラシアン行列を構築し、第二最小固有値 λ_2 およびそれに対応する Fiedler ベクトルを算出した。さらに、Fiedler ベクトルの成分値に基づいて、道路リンク単位の脆弱度を算出した。

3.1.3 OSM 道路データの前処理フロー

OSM の道路データは地理的形状の表現を主目的としており、交差点が必ずしも明示的なノード (point) として定義されていない場合がある。本来、ネットワーク解析の前処理としては、GRASS GIS の v.net connect 等を用いて交差点分割を行い、交差点をノードとして抽出したトポロジカルに整合した道路ネットワークへ変換することが望ましい。しかし本研究では、データ加工を最小限に抑え、入力データの構造的・特性そのものも含めて評価するという方針の下で、交差点分割によるトポロジー補正は実施せず、OSM の道路形状データを可能な限り原データのまま用いた。このため、一部の交差点がノードとして明示的に表現されず、グラフ構造上の接続関係が実際の道路構造と完全には一致しない可能性がある点に留意する必要がある。トポロジー補正の導入およびその影響評価は、今後の課題とする。

ネットワーク解析に先立ち、以下の前処理を行った。

1. **OSM 道路中心線の取得:** QGIS[14] の QuickOSM プラグインを用い、能登半島地区を対象として OSM から道路データを取得した。この際、自動車が通行可能であり、解析対象として妥当と判断される道路種別を対象とし、極端に細分化された生活道路については、計算負荷の増大や結果解釈の困難化を防ぐため、解析対象から除外した。詳細については付録 B に記載する。
2. **行政区域による空間的切り出し:** 取得した道路データに対し、石川県の行政区域ポリゴンを用いてベクタクリップを行った。海岸線付近における道路の切断を防ぐため、行政境界に対して 500 m のバッファを付加した上で処理を行った。
3. **ネットワーク化:** OSM の道路データに含まれる point (ノード) および line (リンク) 情報を用いて、道路ネットワーク構造を構築した。
4. **最大連結成分の抽出とグラフ化:** 得られた道路ネットワークを Python で読み込み、graph-tool[15] を用いてグラフ構造へ変換した。孤立した小規模成分の影響を除外するため、最大連結成分のみを解析対象とした。

5. λ_2 に基づく脆弱度算出: 最大連結成分に対してラプラシアン行列を構築し、第二最小固有値 λ_2 およびそれに対応する Fiedler ベクトルを算出した。さらに、Fiedler ベクトルの成分値に基づいて、道路リンク単位の脆弱度を算出した。

3.2 ハザードマップデータ

国土地理院のハザードマップポータルサイト [16] で提供されている 22 種類のハザードマップデータのうち、災害との関連性に加え、道路寸断リスク評価や緊急輸送路の確保といった災害対応上の意思決定に利用可能な空間解像度を有するものを対象として、地震災害および豪雨災害に関連が強いハザードマップを表 3.1 に整理した。このうち、本研究では、令和 6 年能登半島地震との対応関係を検証するため、地震災害に関しては土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）および津波浸水想定区域を用いた。

表 3.1: 災害と関連が強いハザードマップの種類

| 災害種別 | ハザードマップの種類 |
|------|-------------------|
| 地震災害 | 土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊） |
| | 津波浸水想定区域 |
| 豪雨災害 | 土砂災害警戒区域（土石流） |
| | 洪水浸水想定区域（計画規模） |

3.2.1 土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）

土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）とは、土砂災害防止法（正式名称：土砂災害警戒区域等に関する法律）に基づき、都道府県が指定する区域のうち、急傾斜地の崩壊により住民の生命または身体に危害が生ずるおそれがあると認められる区域である。主に傾斜角度の大きい斜面や住宅地背後の斜面部などに設定され、地形条件、地質特性、降雨条件、過去の災害履歴等を踏まえて指定される。警戒区域内では、警戒避難体制の整備や住民への情報提供が図られる。このように、土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）は、斜面崩壊災害による人的被害の軽減を目的としたリスク情報として位置づけられている [17]。図 3.3 に、石川県の土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）の例を示す。

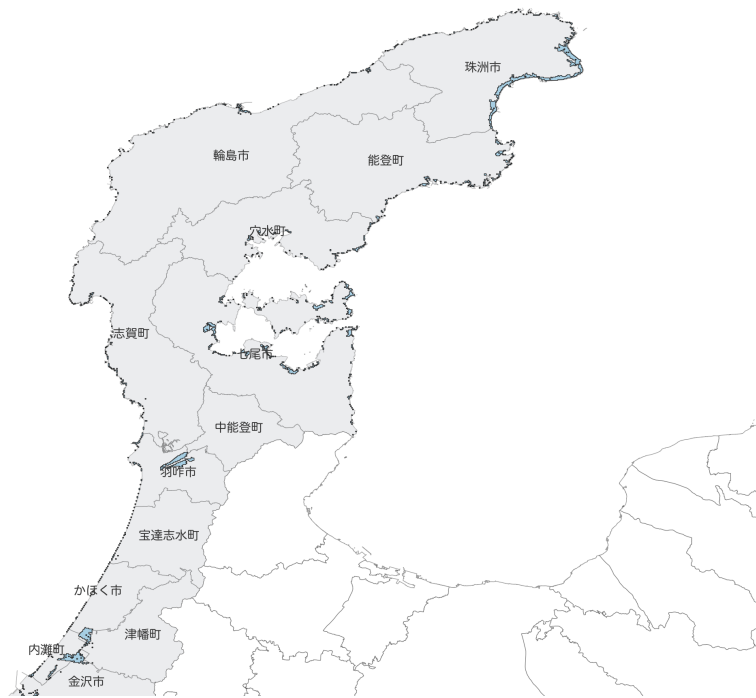


図 3.4: 津波浸水想定区域

理手順を次に示す。なお括弧内の Python スクリプトファイル名は付録 C ソースコード，付録 D 実行環境構築と対応している。

1. **都道府県単位タイル範囲の取得 (download_pref_tiles.py)** : 国土地理院の WMTS (Web Map Tile Service) 仕様に基づき，対象都道府県を包含するタイル座標範囲 (ズームレベル， x 座標， y 座標) を自動的に算出した。行政区画ポリゴンを基準としてタイル範囲を決定することで，手動指定による取得漏れや過剰取得を防止している。
2. **タイル画像の取得および GeoTIFF 生成 (download_geotiff.py)** : 上記で算出したタイル座標に基づき，ハザードマップのタイル画像をダウンロードし，これらを結合して単一の GeoTIFF 形式ラスタデータとして出力した。この処理により，タイル分割された画像データを，空間参照情報を保持した解析可能なラスタ形式へ変換している。
3. **有効領域ポリゴンの抽出 (extract_valid_polygons.py)** : 生成した GeoTIFF 画像に対して画素値の判定処理を行い，ハザードが定義されている有効領域のみを抽出した。抽出結果はベクタ形式 (ポリゴン) として保存し，道路ネットワークと

の空間的重なり解析に利用可能な形式へ変換した。

以上の前処理により、タイル配信形式で提供されるハザードマップデータを、空間解析およびネットワーク評価に直接利用可能なポリゴンデータへ統一的に変換した。本手法は、全国規模のハザードデータに対しても自動処理が可能であり、再現性の高いデータ生成パイプラインを構成している。

3.3 被災域データ

実際の災害被災域データとして、国土地理院が公開する令和6年(2024年)能登半島地震に関する情報[19]を採用した。被災域データは前処理を行わず原データのまま解析に用いた。

3.3.1 斜面崩壊・堆積分布データ

国土地理院が1月2日、5日、11日、14日及び17日に撮影した空中写真(正射画像)・(珠洲地区、輪島東地区、輪島中地区、輪島西地区、穴水地区、七尾地区)から、令和6年能登半島地震によって生じたと考えられる斜面崩壊地及び土砂堆積箇所の範囲について判読(一部は再度判読)したものである。図3.5の赤で示された部分が斜面崩壊・堆積分布箇所である。

3.3.2 空中写真判読による津波浸水域(推定)

国土地理院が1月2日、5日、11日、14日及び17日に撮影した空中写真(珠洲地区、輪島東地区、輪島西地区、穴水地区、七尾地区)から、令和6年能登半島地震によって生じたと考えられる津波到達範囲(堤外地を含む)を判読(一部を再判読)して作成したものである。図3.6の青で示された部分が津波浸水域(推定)箇所である。

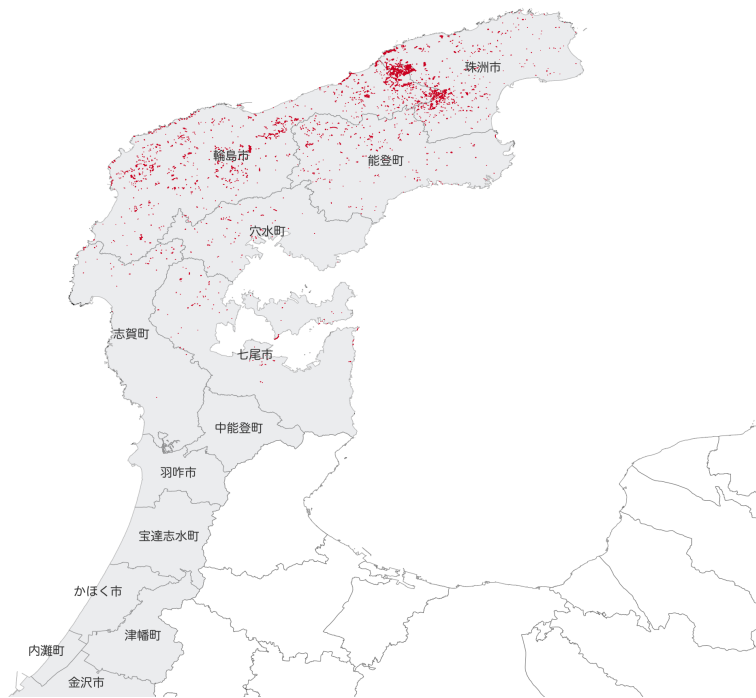


図 3.5: 斜面崩壊・堆積分布データ



図 3.6: 空中写真判読による津波浸水域 (推定)

3.4 分析に用いたツール・ライブラリ

- **QGIS** オープンソースのデスクトップ GIS (Geographic Information System) であり、ベクタ・ラスタデータの可視化、編集、空間解析を統合的に行うことができる。多数のプラグインや外部 GIS エンジンとの連携機能を備えており、研究用途から実務まで幅広く利用されている。本研究では、OSM 道路データの取得 (QuickOSM)、行政区域による空間的切り出し、GRASS GIS を用いたトポロジー構築の前処理、および道路やハザードマップなどの可視化ツールとして QGIS を用いた。
- **GRASS GIS (v.net connect)** オープンソースの地理情報解析ソフトウェアであり、大規模空間データのトポロジー処理やネットワーク解析に強みを持つ。本研究では、道路中心線データからトポロジカルに整合したネットワーク構造を構築するため、GRASS GIS の v.net connect アルゴリズムを用いた。v.net connect は、道路線分間の交差や近接関係を解析し、交差点位置にノードを自動生成するとともに、道路中心線を分割することで、グラフ構造として利用可能な道路ネットワークを構築する機能を有する。これにより、交差点を明示的にノードとして扱うネットワーク表現が可能となり、連結性評価や固有値解析に適したトポロジー構造を生成できる。
- **graph-tool** 道路ネットワークはノード・リンク数が大きく、固有値計算においては計算コストと数値安定性の両面が課題となる。そこで本研究では、高速なグラフ処理 (連結成分抽出等) と疎行列固有値計算を一貫して扱える Python パッケージである graph-tool を採用した [15, 20]。また、再現可能性を重視し、前処理 (QGIS/GRASS によるトポロジー構築) と解析 (graph-tool によるグラフ化および固有値計算) を明確に分離した。

第4章

提案手法

本研究では、道路ネットワークをグラフ構造として捉え、その連結性に着目して脆弱度を評価する。災害時に問題となるのは、個々の道路リンクが被害を受けることに加え、それらの被害がネットワーク全体の分断や到達性の低下として現れる点にある。このような構造的な弱点を定量的に捉えるため、本研究ではグラフラプラシアン行列のスペクトル特性を用いる。

ラプラシアン行列の第二最小固有値 (Fiedler 値) λ_2 は、ネットワークの連結性や分断のされにくさを表す代表的な指標であり、 λ_2 が小さいほどネットワークは分断されやすいことが知られている。本研究では、 λ_2 を道路ネットワーク全体のグローバルな連結性指標として用いるとともに、対応する第二最小固有ベクトル (Fiedler ベクトル) を用いて、道路リンク単位の局所的な脆弱度を評価する。この指標は、ネットワーク分断に寄与しやすいリンクを構造的観点から抽出するための近似的評価指標である。本手法の特徴は、平常時ネットワークと災害影響後ネットワークに対して同一の評価指標を適用することで、災害前後における連結性および脆弱度分布の変化を一貫した枠組みで直接比較できる点にある。

4.1 脆弱度評価の基本的考え方

道路ネットワークの構造は、自然地形との相互作用の下で形成され、標高差や起伏といった地形条件が道路配置やネットワーク形状に統計的に有意な影響を与えることが指摘されている [21]。さらに、集落配置や土地利用などの空間的制約が、地理空間上に配置されたネットワークとしての道路網構造を規定する重要な要因の一つであることも報告されている [22]。加えて、標高差や地形起伏といった地形条件が、道路ネットワークの空間充

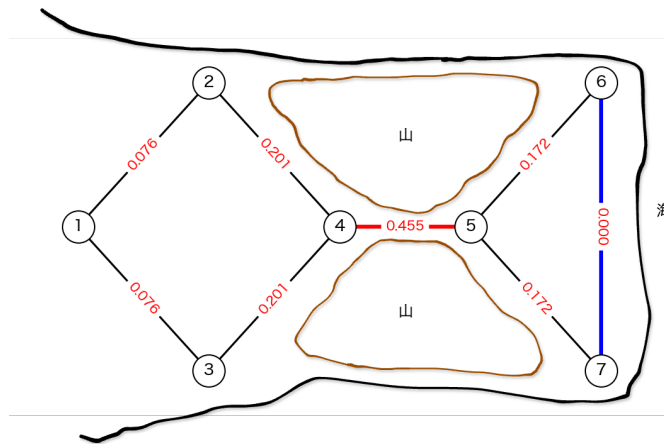
填性や経路効率などの形態的特性に対して有意な影響を及ぼすことが、近年の大規模実証研究により定量的に示されている [23, 24]. 特に半島地域のように地形的制約が強い地域では、代替経路の形成が困難となりやすく、冗長性の低い道路構造が形成される傾向にあるため、その結果として道路ネットワークの構造的特性が災害時の寸断リスクと直接的に関係すると考えられる.

例えば、前出の小規模ネットワーク例 (図 2.1) では、左側クラスタと右側クラスタを結ぶリンク (4,5) が、二つの部分ネットワークを接続する唯一の経路として機能しており、構造的ボトルネックとして確認できる. 本研究で定義した脆弱度指標においても、当該リンクの値は 0.455 と最も高く算出されており、ネットワーク構造に基づく定量評価結果と直感的な構造特性が整合していることが分かる.

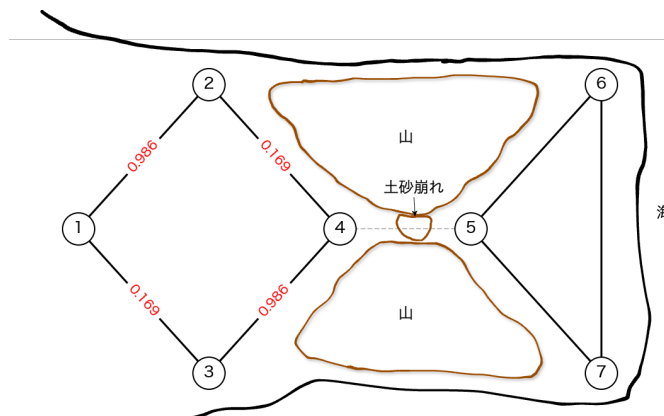
図 4.1 は、この関係を模式的に示したものである. 図 4.1a では、半島状の地形を重ねて表示しており、リンク (4,5) の南北に山地が存在することで、当該区間が地形的制約を強く受けた山間部の道路として形成されている様子を示している. これは、道路ネットワークの構造が地形条件に規定され、結果として特定のリンクに交通機能が集中する状況を表している.

図 4.1b は、土砂災害によりリンク (4,5) が寸断された場合を示しており、左側地区と右側地区がネットワーク的に分断され、互いに到達不能となる様子が確認できる. このように、高い脆弱度を有するリンクは、災害時にネットワーク全体の連結性低下や孤立の発生に直結するリスクを内在していることが分かる.

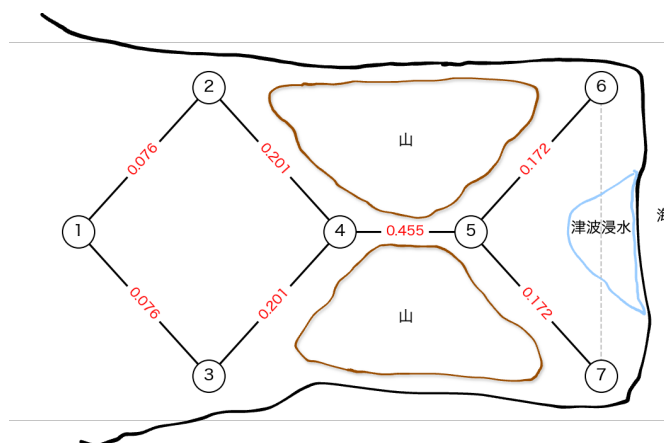
一方、図 4.1c は、津波浸水により海岸沿いのリンク (6,7) が寸断された場合を示しているが、この場合にはネットワーク全体の連結性は維持されており、代替経路 $6 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ を通じた迂回が可能である. 当該リンクの脆弱度が相対的に低く評価されていることは、トポロジー的に見た分断影響の小ささと整合している. 以上の例は、道路ネットワークが地形制約の下で形成されることにより、平常時から潜在的な構造的弱点を内包しており、脆弱度指標がそのような災害時の分断リスクを事前に定量的に捉え得ることを示している.



(a) 地形制約下に形成されたボトルネック構造



(b) 土砂災害によるボトルネック区間 (4, 5) の寸断



(c) 津波浸水による海岸沿い区間 (6, 7) の寸断

図 4.1: 地形制約に起因する脆弱度と災害による道路寸断影響との整合関係

4.2 平常時の道路ネットワーク脆弱度評価

中山ら [9] の道路ネットワーク連結性のラプラシアン行列の第二最小固有値による定量化手法を用いて、平常時の道路ネットワークの脆弱度を算出する。第 3 章で構築した道路ネットワークを、ノード集合 V とリンク集合 E からなる無向重み付きグラフ $G = (V, E)$ として表現する。本研究では、非連結成分の混在によって λ_2 が自明にゼロとなることを避け、連結性指標としての解釈可能性を確保するため、ネットワークの最大連結成分のみを解析対象とする。ノード数を $n = |V|$ とする。

各道路リンク $(i, j) \in E$ には、地理空間上で計測された道路長 d_{ij} が付与されている。本研究では、道路長が短いほど移動しやすいという仮定のもと、リンク重みを

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (4.1)$$

と定義する。

重み付き隣接行列 $W = [w_{ij}]$ および次数行列 $D = \text{diag}(\sum_j w_{ij})$ を用いると、グラフラプラシアン行列 L は

$$L = D - W \quad (4.2)$$

と定義される。 L は半正定値対称行列であり、その固有値を

$$0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n \quad (4.3)$$

と並べたとき、第二最小固有値 λ_2 はネットワークの連結性を特徴づける重要な指標となる。

λ_2 に対応する固有ベクトルを

$$\mathbf{y}^{(2)} = (y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_n^{(2)}) \quad (4.4)$$

とする。本研究では [9] と同様に Fiedler ベクトルの成分差がネットワーク分断に対する感度を反映している点に着目し、道路リンク (i, j) の脆弱度を

$$v_{ij} = \left| y_i^{(2)} - y_j^{(2)} \right| \quad (4.5)$$

と定義する。 v_{ij} が大きいリンクほど、ネットワークの連結性に対して相対的に重要な役割を果たしていると解釈できる。

このようにして得られた平常時のリンク脆弱度分布の一例を、図 4.2 および図 4.3 に示す。なお、図中における脆弱度の高いリンクの強調表示スタイルの凡例、および脆弱度判定に用いた閾値を表 4.1 に示す。

表 4.1: 図中表示スタイルの凡例および脆弱度判定閾値

| 表示 | 意味 |
|--------------------|-------------------------------------|
| 太いオレンジ線 | 脆弱 (脆弱度 \geq 閾値) |
| 細い青線 | その他の道路リンク |
| 脆弱度判定に用いた閾値 | |
| 緊急輸送道路 | 0.00646 (脆弱度平均値の 3 倍) |
| OSM 道路 | 6.35×10^{-5} (脆弱度平均値の 3 倍) |

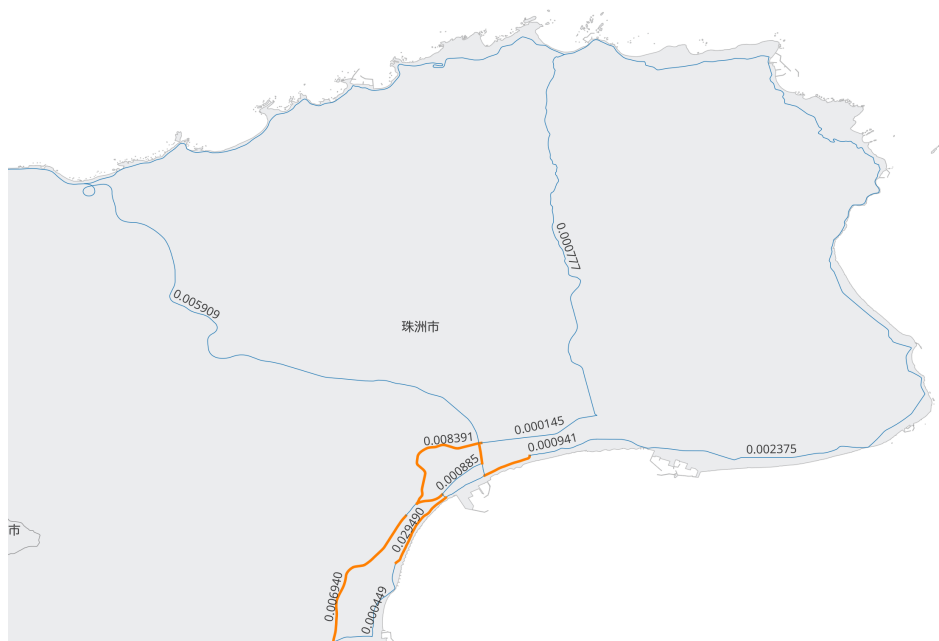


図 4.2: 平常時の緊急輸送道路ネットワークの脆弱度分布 (珠洲市)

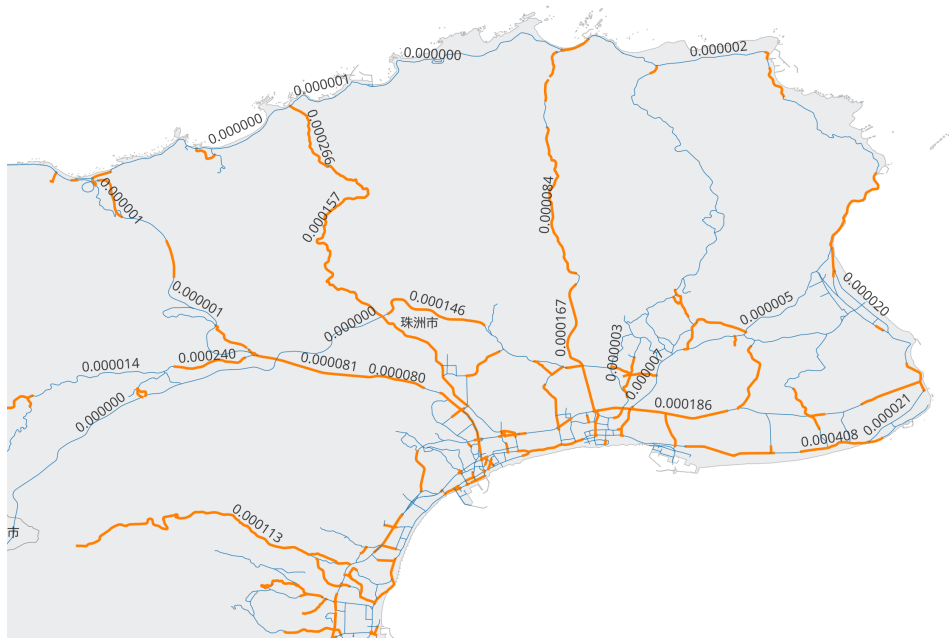


図 4.3: 平常時の OSM 道路ネットワークの脆弱度分布 (珠洲市)

4.3 災害時を考慮した道路ネットワーク脆弱度評価

災害時の影響を考慮するため、国土地理院が公開するハザードマップを用いる。本研究では、ラスター形式で提供されるハザードマップをベクタ形式のポリゴンデータへ変換し、道路ネットワークとの空間的重なりを判定する。例として、土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）ハザードマップと重なりが認められた緊急輸送道路（珠洲市）の例（図 4.4）と、OSM 道路（珠洲市）の例（図 4.5）を示す。

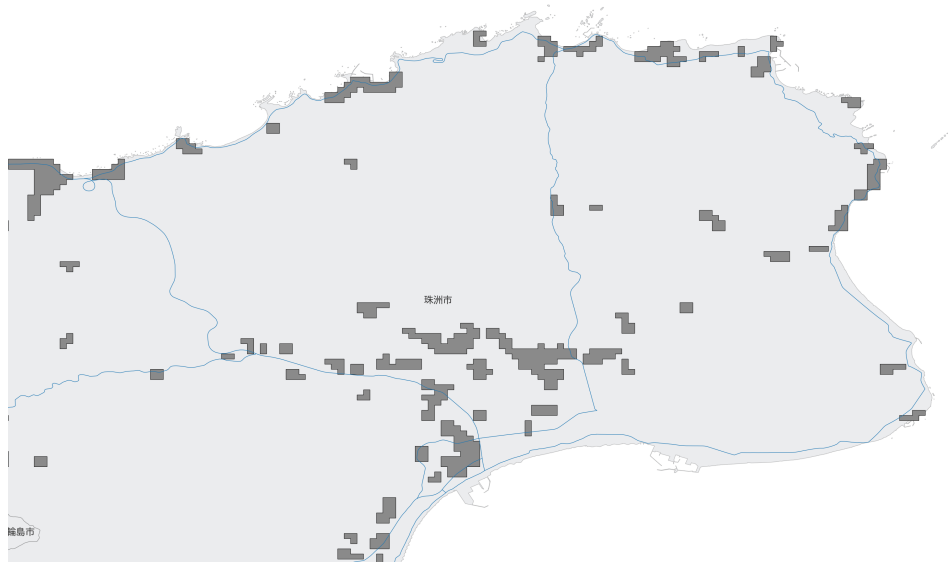


図 4.4: 緊急輸送道路と土砂災害ハザードマップの重なり（珠洲市）

ハザードマップと重なりが認められた道路リンクは、当該災害シナリオにおいて通行不能となる可能性が高いと仮定し、ネットワークから除去する。その後、残存する道路リンクから再度ネットワークを構築し、最大連結成分を抽出する。なお、道路リンクとハザード領域との空間的重なりについては、リンク長に対する重なり区間の割合を算出したが、本研究では解析の単純化に加え、災害リスクを過小評価することを避ける保守的評価の観点から、リンクの一部でもハザード領域と重なった場合には「影響あり（寸断可能性あり）」と判定する 2 値的な分類を採用した。重なり判定方法については、付録 C ソースコードに記載する。

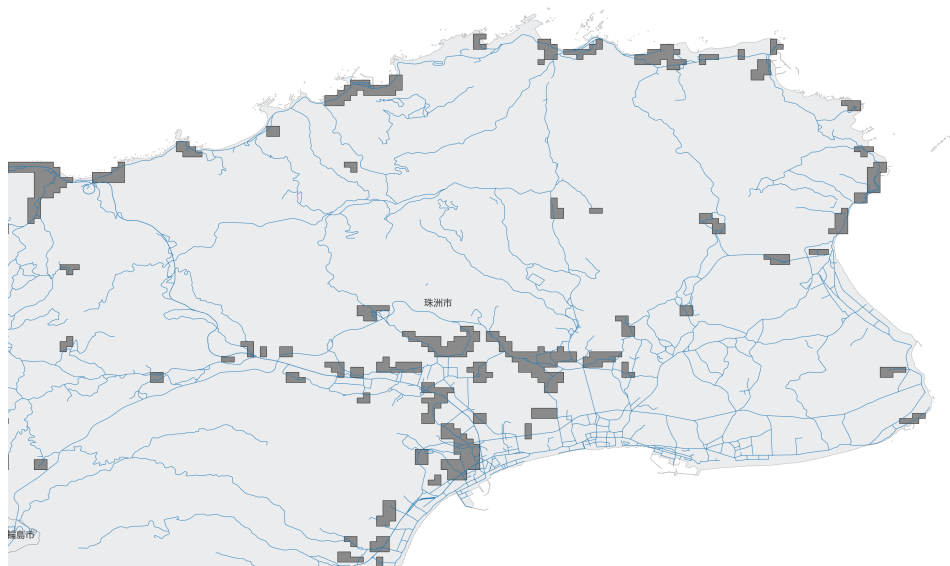


図 4.5: OSM 道路と土砂災害ハザードマップの重なり (珠洲市)

4.4 脆弱度評価および災害影響シミュレーションの実装

本研究では、前節で定義した脆弱度指標の計算およびハザードマップに基づく災害影響判定を対象として、Python により自動処理可能な解析パイプラインを実装した。処理の流れは、「平常時ネットワークの構造解析 → 脆弱リンクの抽出 → 脆弱かつ寸断可能性ありリンクの抽出」という 3 段階から構成される。実装は対応する以下の 3 つのスクリプトにより構成されている。なお括弧内の Python スクリプトファイル名は付録 C ソースコード、付録 D 実行環境構築と対応している。

1. **平常時ネットワークの構造解析 (calc_criticality_noto.py)** 平常時の道路ネットワークを入力として、まず最大連結成分を抽出し、孤立ノードや微小成分を除外した解析対象グラフを構築する。次に、各道路リンクの長さ情報に基づいて重み付き隣接行列を生成し、グラフラプラシアン行列を構築する。これに対して固有値分解を行い、第二最小固有値 λ_2 および対応する Fiedler ベクトルを算出する。さらに、隣接ノード間の Fiedler ベクトル成分差に基づき、各道路リンクの脆弱度 v_{ij} を計算し、リンク単位の脆弱度分布として出力する。この処理により、ネットワーク構造に内在するボトルネック候補区間を定量的に抽出する。
2. **脆弱リンクの抽出 (extract_disrupted_roads_noto.py)** ハザードマップから生成したポリゴンデータと道路ネットワークを空間的に重ね合わせ、災害影響領域と交差する道路リンクを抽出する。ここでは、リンクの一部でもハザード領域と重なった場合、当該リンクが災害の影響を受ける可能性があるともみなし、寸断候補リンクとしてフラグ付けを行う。抽出結果は、後続処理において寸断判定対象リンク集合として利用される。
3. **脆弱かつ寸断可能性ありリンクの抽出 (simulate_criticality_noto.py)** 上記で抽出された寸断候補リンクについては、災害後の道路ネットワークを再構築することは行わず、ハザードマップとの空間的重なりの有無に基づいて、各道路リンクに寸断フラグを付与する。すなわち、ハザード領域と重なりが認められたリンクを「寸断可能性あり」と判定する。その上で、平常時ネットワークにおいて算出したリンク脆弱度分布 v_{ij} と寸断判定結果を対応付けることで、「脆弱かつ寸断可能性あり」と「脆弱のみ」の分類を行い、構造的脆弱性と災害影響との関係を定量的に評価する。災害後の道路ネットワークを再構築しない理由は、ネットワーク構造が変化した場合、リンク脆弱度の直接比較が困難となるため、本研究では平常時ネッ

トワークに基づく脆弱度指標とハザード起因の寸断判定を分離して評価する構成とした。

以上の処理により、平常時ネットワークに基づいて算出した構造的脆弱度と、ハザードマップに基づく寸断判定結果との対応関係を、一貫した計算フローとして自動的に評価できる。本実装は、都道府県単位や半島全域といった広域ネットワークに対しても適用可能であり、解析条件を変更することで複数の災害シナリオを系統的に比較可能な、再現性の高い解析パイプラインを構成している。

4.5 脆弱度の可視化手法

算出したリンク脆弱度は、地理情報システム (GIS) 上で可視化する。本研究では QGIS を用い、脆弱度の大小に応じて道路リンクを三段階に分類し、空間分布として表示する。この可視化により、ネットワーク構造に起因する重要区間や、災害時にボトルネックとなる可能性の高い道路区間を空間的分布として把握することが可能となる。例として、土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）ハザードマップと緊急輸送道路（珠洲市）の実験結果の可視化の例 (図 4.6) と、OSM 道路（珠洲市）の例 (図 4.7) を示す。なお、図中における脆弱度の高いリンクの強調表示スタイルの凡例、および脆弱度判定に用いた閾値を表 4.2 に示す。

表 4.2: 図中表示スタイルの凡例および脆弱度判定閾値

| 表示 | 意味 |
|-------------|---------------------------------------|
| 太い赤線 | 脆弱かつ寸断 (脆弱度 \geq 閾値 かつ 重なり率 > 0) |
| 太いオレンジ線 | 脆弱のみ (脆弱度 \geq 閾値 かつ 重なり率 = 0) |
| 細い青線 | その他の道路リンク |
| 脆弱度判定に用いた閾値 | |
| 緊急輸送道路 | 0.00646 (脆弱度平均値の 3 倍) |
| OSM 道路 | 6.35×10^{-5} (脆弱度平均値の 3 倍) |

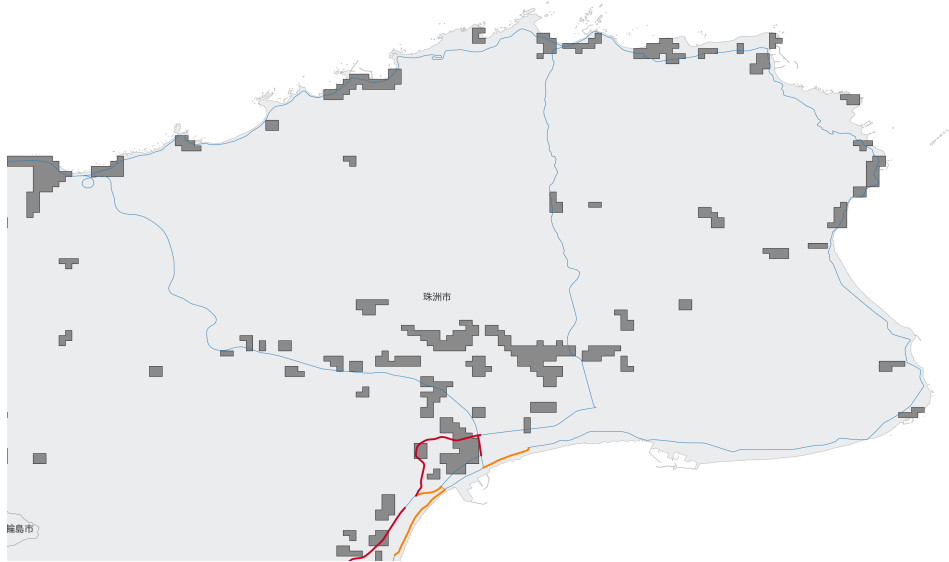


図 4.6: 緊急輸送道路と土砂災害ハザードマップの実験結果 (珠洲市)

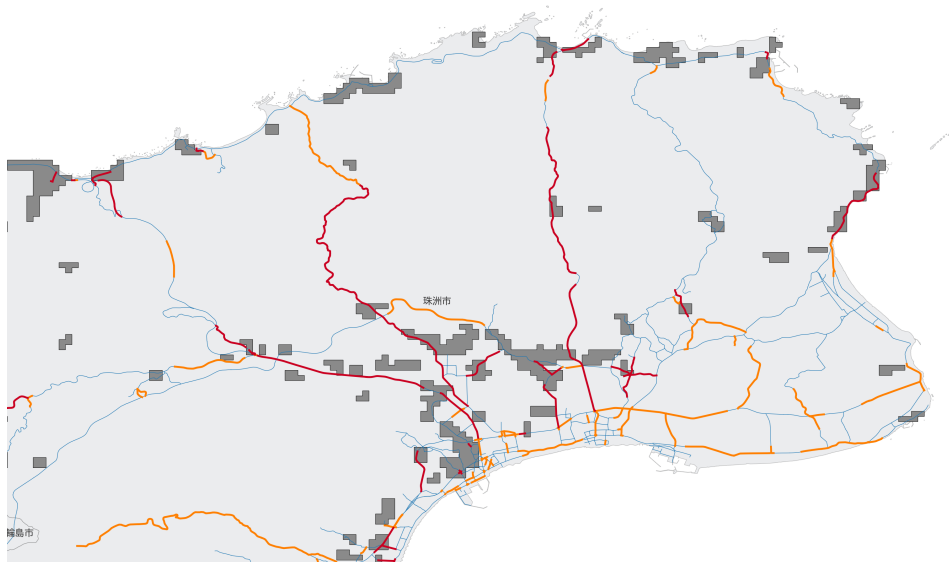


図 4.7: OSM 道路と土砂災害ハザードマップの実験結果 (珠洲市)

本研究で提案する手法の特徴は、道路ネットワーク全体の連結性を表す指標である第二最小固有値 λ_2 と、Fiedler ベクトルに基づくリンク脆弱度 v_{ij} を、同一の数理的枠組みに基づいて一貫して評価できる点にある。これにより、ネットワーク全体の構造的健全性と、個々の道路リンクが果たす構造的役割との関係を定量的に対応づけることが可能となる。

また、本手法は国土数値情報、OpenStreetMap、国土地理院ハザードマップなどの公開データのみを用いて構成されており、特定の交通需要データや詳細な交通流シミュレーションを必要としない。このため、再現性が高く、地域間比較や異なる災害シナリオ間の比較分析に容易に適用できるという実務的な利点を有する。さらに、平常時ネットワークと災害影響を反映した劣化ネットワークを同一の評価指標で比較することにより、災害による構造的劣化の度合いを定量的に評価できる点も本手法の重要な特徴である。

以上の特性から、本研究の手法は、交通需要推定や交通流再現を目的とする交通工学的手法とは異なり、道路ネットワークの構造的連結性とその脆弱性を俯瞰的に評価するための基盤的解析手法として位置づけられる。防災計画における重点補強区間の抽出や、広域災害を想定した事前リスク評価への応用が期待される。

次章では、本手法を能登半島地域の実道路ネットワークに適用し、平常時およびハザードマップとの重ねによる災害影響下における脆弱度分布の特徴を分析するとともに、令和6年能登半島地震における実被災データとの対応関係についても検証する。

第5章

実験・評価

本章では、平常時の道路ネットワーク構造に基づく脆弱リンク抽出結果について、ハザードマップおよび令和6年能登半島地震の実災害データとの空間的対応を比較する。あわせて、適合率および再現率に基づく定量評価により、道路種別・災害種別・市町別の差異を整理する。

5.1 評価指標の定義

5.1.1 適合率・再現率の定義

本研究では、Fiedler ベクトルに基づく脆弱度評価結果と、ハザードマップおよび実災害データとの重なりを評価するために、適合率 (Precision) および再現率 (Recall) を用いる。適合率および再現率は、主に情報検索や機械学習における二値分類問題において、検出結果の妥当性を評価するために用いられる指標である。本研究では、道路を脆弱か否かの二値問題として扱い、とくに災害時に重要となる「被災道路の見逃し」と「過剰検出」の両者を評価する必要があることから、これらの指標を採用した。なお、本研究における道路区間の一致判定には、「道路リンクの本数に基づく評価」と「道路延長に基づく評価」の2通りの方法が考えられるが、本研究では後者を採用した。すなわち、各集合の大きさ $|A|, |B|, |A \cap B|$ は、道路リンク数ではなく、道路区間長の総和として定義している。これにより、短区間が多数検出されることによる評価の偏りを抑制し、実際の輸送機能への影響度をより適切に反映した指標評価を可能としている。これらの指標は、図 5.1 に示すように、Fiedler ベクトルに基づいて脆弱と判定された道路と、ハザードマップと重なっている道路、つまり災害時に寸断される可能性がある道路、および実際の災害で寸断され

た道路との重なりを基に計算される。

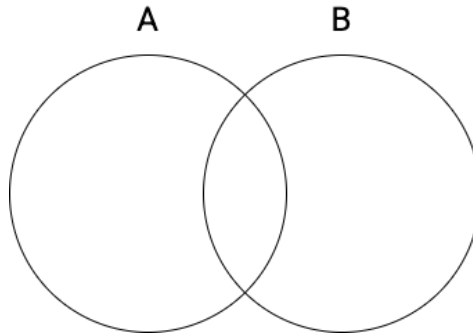


図 5.1: 適合率・再現率の定義

- **A (脆弱)** : Fiedler ベクトル成分値の差が所定の閾値 (脆弱度平均値の 3 倍) 以上となる道路集合と定義する。
- **B (寸断)** : 道路とハザードマップとの重なりに基づき, 災害時に寸断の可能性があると判定された道路集合とする (実災害の場合は航空写真による被災箇所との重なりに基づく)。
- $A \cap B$: 「脆弱」かつ「寸断」と判定された道路集合を正例と定義する。
- **適合率 (Precision)** : 脆弱と判定した道路集合 A のうち, 実際に寸断と判定された道路の割合と定義し, 次式で与える。

$$Precision = \frac{|A \cap B|}{|A|}$$

- **再現率 (Recall)** : 寸断の可能性のある道路集合 B のうち, 脆弱として検出できた道路の割合と定義し, 次式で与える。

$$Recall = \frac{|A \cap B|}{|B|}$$

5.1.2 脆弱度の閾値

脆弱度に基づく道路リンクの二値分類においては、脆弱度分布の裾野に位置する高値領域を抽出する目的で、平均値の3倍を主閾値として設定した。図5.2および図5.3に、それぞれ緊急輸送道路およびOSM道路における脆弱度分布を示す。いずれの分布においても裾の長い右偏分布が確認され、少数の高脆弱リンクがネットワーク全体の構造的弱点を形成していることが分かる。

平均値の3倍という閾値は、脆弱度分布が右に長い裾を持つ非対称分布を示すことを踏まえ、分布の裾野に位置する極端値を安定的に抽出するために設定した。過度に高い閾値を設定した場合には抽出対象が極端に少数となり統計的な比較が困難となる一方、低すぎる閾値では高脆弱リンクと中程度脆弱リンクの区別が不明瞭となる。本研究では、これらのトレードオフを考慮し、複数の候補値を試行した結果、分布形状と抽出数のバランスが最も良好であった平均値の3倍を主閾値として採用した。

なお、脆弱度の平均値の2倍と5倍を閾値とした場合の適合率・再現率についても付録B 実験結果の詳細なデータに示す。

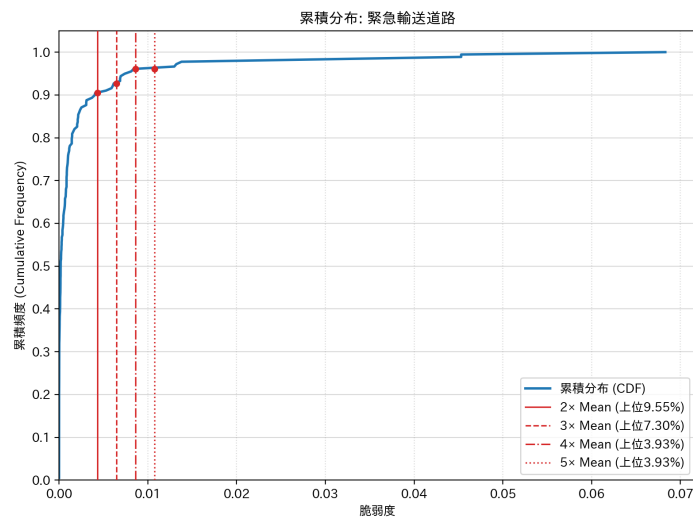


図 5.2: 緊急輸送道路の脆弱度の分布

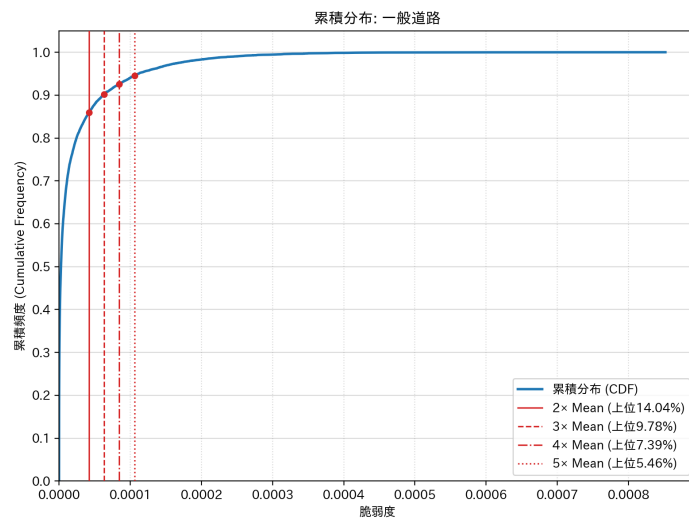


図 5.3: OSM 道路の脆弱度の分布

5.2 ハザードマップとの比較結果

本節では、提案手法により算出した平常時の道路ネットワークの脆弱度分布と、国土地理院が提供するハザードマップとの空間的対応関係を比較する。具体的には、各災害シナリオに対応するハザードマップポリゴンと道路リンクとの重なり判定を行い、災害時に通行不能となる可能性がある道路集合を抽出した。これにより、ネットワーク構造に基づいて推定された脆弱なリンクと、地理的リスク情報に基づく寸断可能区間との整合性を評価する。

表 5.1 に、道路種別および災害種別ごとの脆弱度判定結果と寸断判定結果のクロス集計を示す。緊急輸送道路と OSM 道路では対象リンク数が大きく異なるものの、いずれのケースにおいても高脆弱リンクは全体の一部に集中していることが分かる。

表 5.1: 道路種別およびハザードマップ災害種別ごとの脆弱度判定と寸断判定の集計結果

| 道路種別 | 災害種別 | 脆弱かつ寸断 | 脆弱のみ | その他 | 合計 | 図 |
|--------|------|--------|------|-------|-------|-------|
| 緊急輸送道路 | 土砂災害 | 6 | 7 | 165 | 178 | 図 5.4 |
| | 津波浸水 | 7 | 6 | 165 | 178 | 図 5.5 |
| OSM 道路 | 土砂災害 | 301 | 936 | 11412 | 12649 | 図 5.6 |
| | 津波浸水 | 201 | 1036 | 11412 | 12649 | 図 5.7 |

図は、対象道路ネットワークと各ハザードマップの空間的な重なり関係を可視化しており、災害種別ごとに影響を受けやすい道路区間の分布特性を直感的に把握できる。

表 5.2: 図中表示スタイルの凡例および脆弱度判定閾値

| 表示 | 意味 |
|-------------|---------------------------------------|
| 太い赤線 | 脆弱かつ寸断 (脆弱度 \geq 閾値 かつ 重なり率 > 0) |
| 太いオレンジ線 | 脆弱のみ (脆弱度 \geq 閾値 かつ 重なり率 = 0) |
| 細い青線 | その他の道路リンク |
| 脆弱度判定に用いた閾値 | |
| 緊急輸送道路 | 0.00646 (脆弱度平均値の 3 倍) |
| OSM 道路 | 6.35×10^{-5} (脆弱度平均値の 3 倍) |



図 5.4: 緊急輸送道路と土砂災害ハザードマップの重なりによる寸断判定結果



図 5.5: 緊急輸送道路と津波浸水ハザードマップの重なりによる寸断判定結果

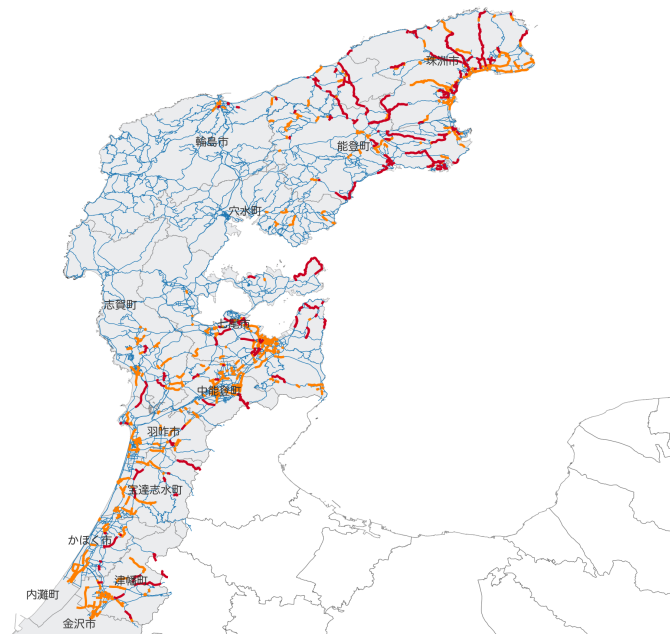


図 5.6: OSM 道路と土砂災害ハザードマップの重なりによる寸断判定結果

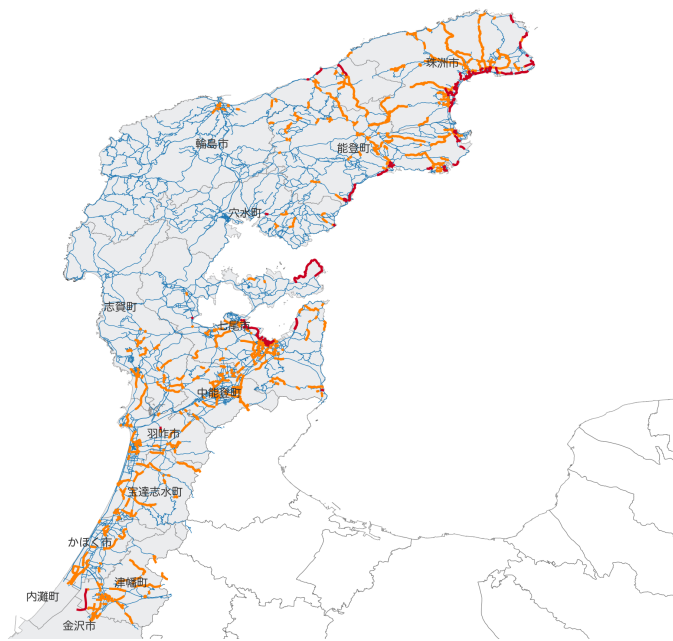


図 5.7: OSM 道路と津波浸水ハザードマップの重なりによる寸断判定結果

5.3 実災害データとの比較結果

本節では、提案手法により算出した道路リンクの脆弱度分布と、令和6年能登半島地震における実災害データとの空間的対応関係を比較する。具体的には、航空写真判読および被害地点データに基づく斜面崩壊・堆積分布および津波浸水域ポリゴンと道路リンクとの重なり判定を行い、実災害時に通行不能となった可能性が高い道路集合を抽出した。

表 5.3: 道路種別および実災害種別ごとの脆弱度判定と寸断判定の集計結果

| 道路種別 | 災害種別 | 脆弱かつ寸断 | 脆弱のみ | その他 | 合計 | 図 |
|--------|-----------|--------|------|-------|-------|--------|
| 緊急輸送道路 | 斜面崩壊・堆積分布 | 2 | 11 | 165 | 178 | 図 5.8 |
| | 津波浸水域 | 2 | 11 | 165 | 178 | 図 5.9 |
| OSM 道路 | 斜面崩壊・堆積分布 | 21 | 1216 | 11412 | 12649 | 図 5.10 |
| | 津波浸水域 | 41 | 1196 | 11412 | 12649 | 図 5.11 |



図 5.8: 緊急輸送道路と実災害での斜面崩壊・堆積分布の重なりによる寸断判定結果



図 5.9: 緊急輸送道路と実災害での津波浸水域の重なりによる寸断判定結果

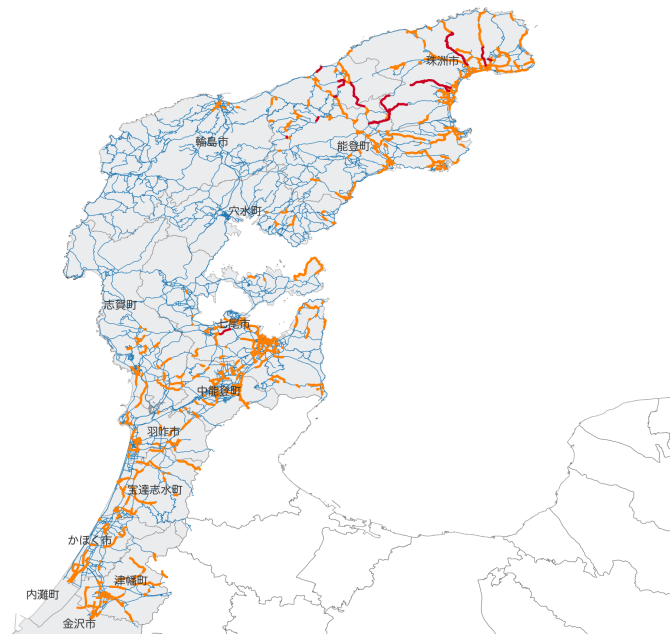


図 5.10: OSM 道路と実災害での斜面崩壊・堆積分布の重なりによる寸断判定結果

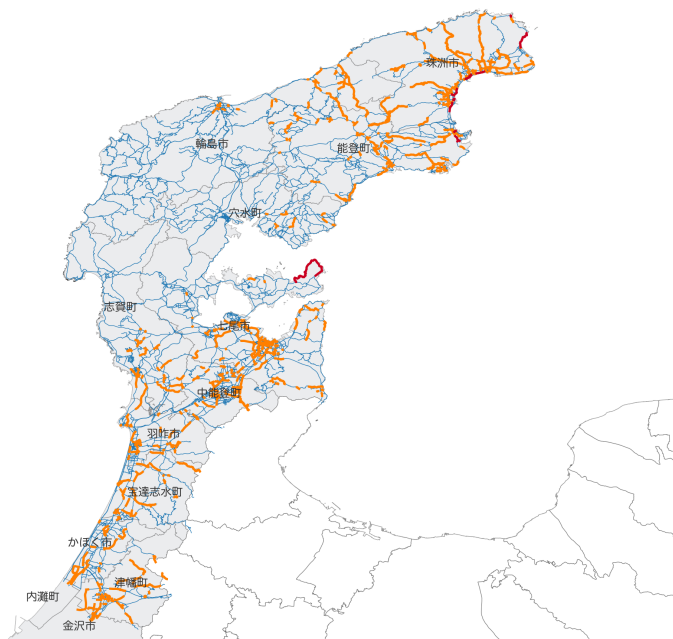


図 5.11: OSM 道路と実災害での津波浸水域の重なりによる寸断判定結果

5.4 道路種別・災害種別・市町別の再現率・適合率の比較

本節では、前節で得られた重なりに基づく寸断判定結果を用いて、適合率および再現率に基づく定量評価を行い、提案手法による脆弱道路抽出結果とハザードマップおよび実災害データとの対応関係を検証する。評価は、道路種別（緊急輸送道路・OSM道路）、災害種別（土砂災害・津波）、および市町単位の空間集計結果に基づいて実施した。

本分析は、自治体レベルにおける防災計画立案や重点的な補強区間選定への応用可能性を念頭に置き、市町単位での再現率および適合率の比較を行った。その結果、再現率および適合率はいずれも地域間で大きなばらつきを示し、道路種別および災害種別によって分布傾向が異なることが確認された。

5.4.1 ハザードマップに基づく適合率の比較

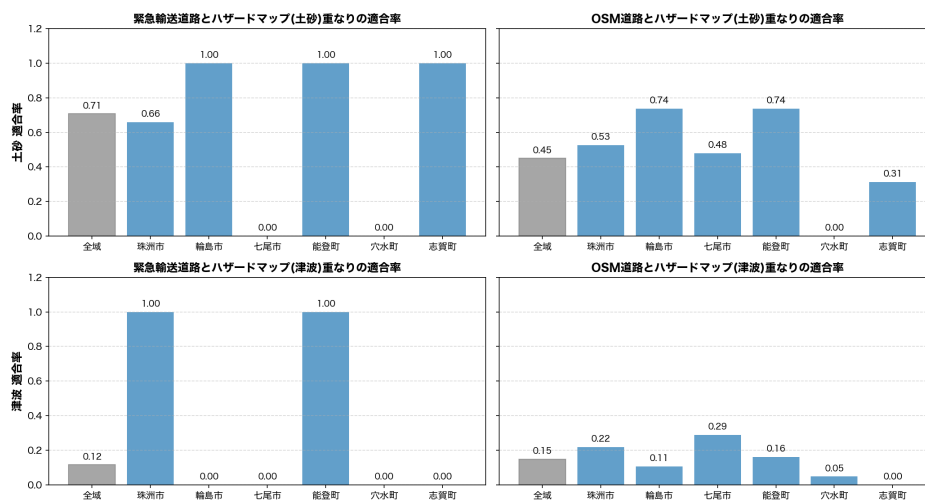


図 5.12: ハザードマップに基づく適合率（閾値：脆弱度平均値の3倍）

表 5.4: ハザードマップに基づく適合率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 3 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 70.76 | 44.93 | 11.64 | 14.86 |
| 珠洲市 | 65.89 | 52.60 | 100.00 | 21.96 |
| 輪島市 | 100.00 | 73.74 | 0.00 | 10.61 |
| 七尾市 | 0.00 | 48.00 | 0.00 | 28.87 |
| 能登町 | 100.00 | 73.68 | 100.00 | 16.18 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.82 |
| 志賀町 | 100.00 | 31.35 | 0.00 | 0.00 |

5.4.2 ハザードマップに基づく再現率の比較

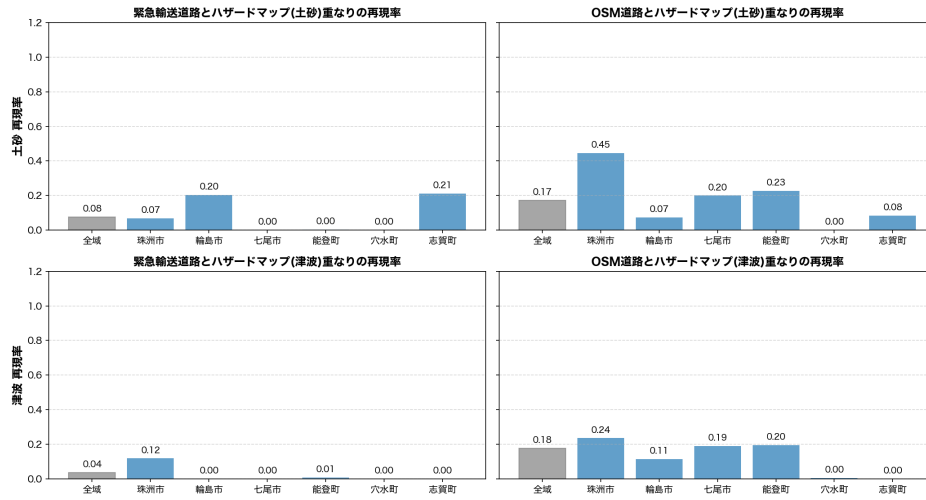


図 5.13: ハザードマップに基づく再現率（閾値：脆弱度平均値の3倍）

表 5.5: ハザードマップに基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の3倍）

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 7.64 | 17.31 | 3.60 | 17.74 |
| 珠洲市 | 6.83 | 44.54 | 11.87 | 23.59 |
| 輪島市 | 20.36 | 7.33 | 0.00 | 11.47 |
| 七尾市 | 0.00 | 20.04 | 0.00 | 19.06 |
| 能登町 | 0.35 | 22.78 | 0.78 | 19.52 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.47 |
| 志賀町 | 21.21 | 8.35 | 0.00 | 0.00 |

5.4.3 実災害データに基づく適合率の比較

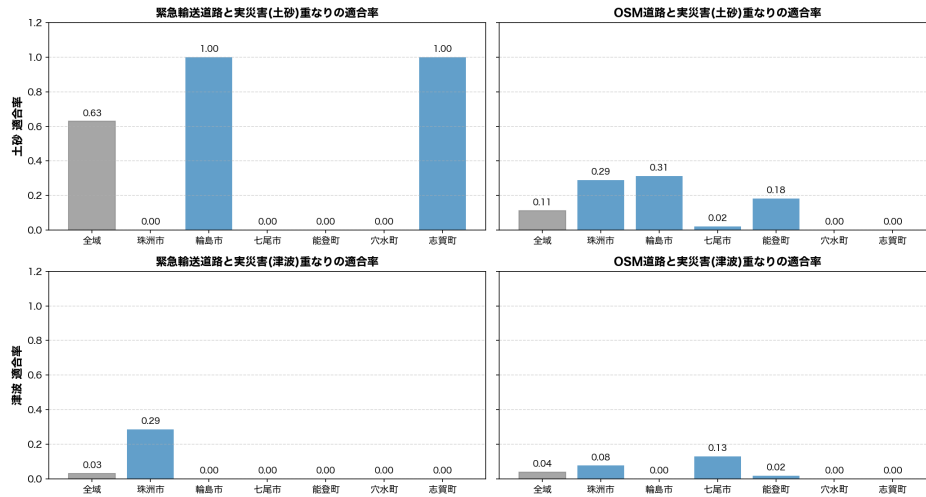


図 5.14: 実災害データに基づく適合率（閾値：脆弱度平均値の3倍）

表 5.6: 実災害に基づく適合率 (%)（閾値：脆弱度平均値の3倍）

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 62.91 | 11.22 | 3.19 | 3.96 |
| 珠洲市 | 0.00 | 28.95 | 28.68 | 7.73 |
| 輪島市 | 100.00 | 31.39 | 0.00 | 0.00 |
| 七尾市 | 0.00 | 2.12 | 0.00 | 13.06 |
| 能登町 | 0.00 | 18.29 | 0.00 | 1.90 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 志賀町 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

5.4.4 実災害データに基づく再現率の比較

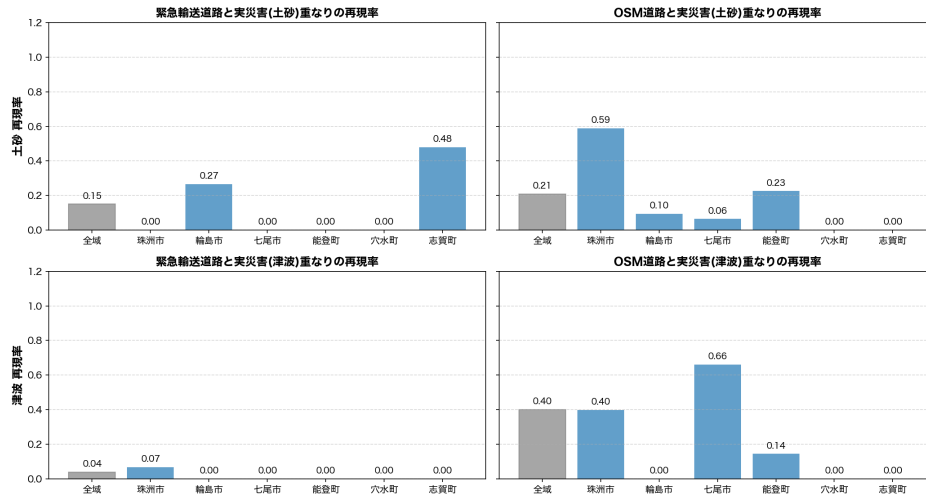


図 5.15: 実災害データに基づく再現率（閾値：脆弱度平均値の3倍）

表 5.7: 実災害に基づく再現率 (%)（閾値：脆弱度平均値の3倍）

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 15.08 | 20.91 | 3.86 | 40.05 |
| 珠洲市 | 0.00 | 58.88 | 6.75 | 39.81 |
| 輪島市 | 26.60 | 9.54 | 0.00 | 0.00 |
| 七尾市 | 0.00 | 6.46 | 0.00 | 66.07 |
| 能登町 | 0.00 | 22.58 | 0.00 | 14.47 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 志賀町 | 47.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

道路種別別の比較では、緊急輸送道路は OSM 道路に比べて適合率が高い一方で、再現率は相対的に低い傾向が一貫して確認された（図 5.12, 図 5.13, 図 5.14, 図 5.15）。例えば、土砂災害（ハザードマップ）においては、輪島市および志賀町の緊急輸送道路で適合率が 1.00 となった一方、再現率は全域で 0.08, 輪島市で 0.20, 志賀町で 0.21 にとどまっております。高い一致度を示す一方で、抽出範囲が限定的であることが示された。

これに対し、OSM 道路では土砂災害において珠洲市で再現率 0.45, 能登町で 0.23 と相対的に高い値が観測されたが、適合率は珠洲市 0.53, 輪島市 0.74, 七尾市 0.48 など、中程度の値に分布した。この結果は、OSM 道路が広範な道路網を含むことにより被災区間の包含率は高まる一方で、誤検出も同時に増加する傾向があることを示唆している。

災害種別別にみると、土砂災害シナリオでは、ハザードマップに基づく緊急輸送道路の適合率が一部地域で高い値を示す一方、再現率は全域で 0.08 程度にとどまり、局所的に高い値を示す市町（例：輪島市 0.20, 志賀町 0.21）を除いて見逃しが残る傾向が確認された。

これに対し、津波災害では、実災害データに基づく OSM 道路の再現率が相対的に高く、七尾市で 0.66, 全域で 0.40 といった値が観測された。一方で、同条件における適合率は七尾市で 0.29, 全域で 0.15 にとどまっております。被災区間の網羅性は高いものの、抽出結果の選択性には改善余地が残ることが示された。このことから、津波災害においては地形的・空間的制約が比較的明確であるため、再現率が向上しやすい一方で、単純な構造指標のみでは誤検出を十分に抑制できない可能性が示唆される。

地域別にみると、市町単位の評価結果には顕著な空間的差異が存在した。例えば、土砂災害では珠洲市において OSM 道路の再現率が 0.45 と高い値を示した一方、津波の災害では七尾市で OSM 道路の再現率が 0.66 と最大値を示した。これらは、災害種別ごとに被害分布の空間的集中度や道路網構造が異なることを反映していると考えられる。

また、一部の市町では適合率または再現率が 0 あるいは 1 となる極端な値が観測されており、対象道路延長や被災区間数が限定される地域では、評価に用いられる対象リンク数が少ないことに起因して指標値が不安定化しやすいため、市町単位評価の解釈には注意を要する。

5.5 まとめと考察

本研究では、能登半島地域の道路ネットワークを対象として、Fiedler ベクトルに基づく構造的脆弱性評価手法を適用し、平常時のネットワーク構造に内在するボトルネック区間の抽出と、ハザードマップおよび実災害データとの空間的対応関係の比較分析を行っ

た。その結果、主要幹線道路を含む緊急輸送道路において高脆弱リンクが集中する傾向が確認され、これらの区間がネットワーク連結性維持において重要な役割を担っている可能性が示された。

ハザードマップを用いた分析では、土砂災害と津波災害で適合率・再現率の分布特性が異なり、災害種別ごとに構造的脆弱性指標との空間的対応関係が変化することが明らかとなった。また、令和6年能登半島地震の実災害データとの比較では、一部地域において再現率が比較的高い値を示し、構造的脆弱性指標が実被災箇所と一定程度対応関係を有することが確認された一方で、適合率については過剰検出が残る傾向も観測された。

これらの結果は、本手法が個別被害の発生箇所を直接予測するモデルではなく、平常時ネットワーク構造に基づいて「災害時に機能低下が連鎖的に拡大しやすい区間」を事前に抽出するための相対評価指標として有効であることを示している。すなわち、本手法は被害発生の有無を確率的に推定する手法というよりも、補強優先区間の抽出や防災投資の重点化を支援する意思決定支援ツールとして位置付けることが適切である。

さらに、 λ_2 によるネットワーク全体の連結性評価と、Fiedlerベクトルに基づく局所的脆弱リンク抽出を組み合わせることで、広域的なネットワーク健全性と局所的なボトルネック構造を同時に把握できる枠組みが構築された点は、本研究の方法論的な意義である。特に、緊急輸送道路において高脆弱リンクが集中する傾向が確認されたことは、災害時の広域輸送機能確保に向けた優先的補強区間の抽出という観点から重要な示唆を与える。

5.6 限界と今後の課題

本研究は構造的脆弱性評価の有効性を示した一方で、実務応用およびモデル拡張に向けて今後検討すべき課題も明らかとなった。

第一に、道路リンクの障害を二値化して扱っている点である。実際の災害では、完全寸断に至らない通行規制や容量低下が生じる場合も多く、段階的な機能低下を考慮したモデル化が今後の重要な課題である。例えば令和6年能登半島地震では震災直後に緊急復旧を行い、片側交互通行や広域のラウンドアバウトによって、輪島市役所、珠洲市役所、能登町役場まで大型車が通行可能となり、縦軸・横軸ラインを確保した[25]。

第二に、ハザードマップの空間的不均一性の取り扱いが挙げられる。実際の災害では、全域が一様に被災するわけではなく、被害は特定地域に集中する傾向を示す。令和6年能登半島地震における斜面崩壊・堆積分布は、珠洲市、輪島市、能登町の一部地域に集中しており、地形条件や震源位置との関係も考慮する必要がある。

第三に、交通需要変化や迂回行動を考慮した動的ネットワーク解析との統合が挙げられる。本研究は構造的脆弱性評価に主眼を置いた静的分析であり、実務的な交通運用評価への応用には、時間変化を考慮した動的モデルとの連携が不可欠である。令和6年能登半島地震における物資輸送では、発災直後は国・自治体主導による「プッシュ型」輸送を中心とした緊急物資供給が行われ、その後、被災地側の需要把握が進むにつれて「プル型」輸送へと段階的に移行する運用が採られた [26]。この過程において、輸送される物資の品目も、水・食料・毛布等の生命維持物資から、生活再建に必要な日用品・資機材へと変化するとともに、避難所間での物資融通や再配分も発生している。このような災害対応物流の時間的推移を考慮すると、道路ネットワークに求められる機能もフェーズごとに変化する可能性が高く、構造的脆弱性評価と交通流・物資流の動態モデルを統合することで、より実践的な災害対応計画支援への発展が期待されるとともに、災害対応計画の定量的支援ツールとしての実用化にも資する可能性がある。

第四に、行政区域境界を超えた広域ネットワーク統合や、他インフラ（電力網・通信網など）への応用可能性の検討も今後の発展的課題である [27, 28]。これらに取り組むことで、本手法はより実践的かつ汎用的なレジリエンス評価基盤へと発展することが期待される。

第6章

おわりに

本研究では、半島地域における大規模災害リスクの高まりを背景として、道路ネットワークの構造的特性に着目した脆弱性評価手法の構築を目的とし、能登半島地域を対象とした実証分析を行った。従来の交通需要や OD 設定に依存した評価とは異なり、本研究はネットワークのトポロジ構造そのものに基づく評価枠組みを採用し、災害時に連結性低下が連鎖的に拡大しやすい区間を事前に抽出することを目指した点に特徴がある。

具体的には、グラフラプラシアン行列の第二最小固有値 λ_2 によるネットワーク全体の連結性評価と、対応する Fiedler ベクトルに基づく局所的ボトルネック抽出を組み合わせることで、広域的なネットワーク健全性と局所的脆弱区間を同時に把握可能な評価枠組みを構築した。この枠組みを実道路ネットワークに適用した結果、平常時ネットワーク構造に基づいて抽出された高脆弱区間と、ハザードマップおよび令和 6 年能登半島地震における実被害区間との間に一定の空間的対応関係が確認され、構造的脆弱性評価が災害影響分布を理解する上で有用な補助的情報となり得ることが示された。

本研究の成果は、被害発生の有無を直接予測するモデルではなく、限られた補強予算や人的資源の中で、どの区間を優先的に対策対象とすべきかを検討するための相対評価指標として位置付けられる。とくに、緊急輸送道路を含む主要路線において高脆弱区間が集中する傾向が確認されたことは、災害時の広域輸送機能維持を目的とした重点補強区間の選定に対して、定量的根拠を与える可能性を有している。

本研究では能登半島を対象としたケーススタディを実施したが、提案した評価枠組みは、半島振興法に基づく全国 23 地域の半島地域を含む、他の地理的条件下の道路ネットワークにも適用可能な一般性を有している。今後、地域特性や災害特性に応じた拡張を行うことで、本手法は事前防災計画の高度化やインフラレジリエンス評価の基盤技術として発展することが期待される。

以上より、本研究は、ネットワーク科学の理論的枠組みを実社会の防災課題へ応用する一つの実証的試みとして、半島地域における道路ネットワーク脆弱性評価の新たな視点を提示した。本研究で構築した評価フレームワークが、将来的な防災計画立案およびインフラ整備戦略の高度化に寄与し、災害時の孤立リスク低減および地域間格差の緩和に資することを期待する。

謝辞

本研究の遂行および論文の作成にあたり，指導教官である林幸雄教授から多大なるご指導とご助言を賜りました．ここに深く感謝の意を表します．また，金沢大学の小林俊一准教授からは，道路データならびに災害とハザードマップの関係に関して貴重なご指摘をいただき，本研究を進める上で重要な示唆を得ることができました．心より御礼申し上げます．さらに，本研究を支えてくださった関係者の皆様に対し，ここに厚く御礼申し上げます．

参考文献

- [1] 国土交通省 国土政策局. 半島地域の活性化に資する施策の推進. 令和 6 年度 政策レビュー評価書, 2024. 最終閲覧日: 2026-01-19.
- [2] 国土交通省 総合政策局 参事官 (物流産業) 室. ラストマイルにおける支援物資輸送・拠点開設・運営ハンドブック - 地方公共団体における支援物資物流の円滑化に向けて - (改訂版). ハンドブック (改訂版), 国土交通省, March 2025. 最終閲覧日: 2025-10-03.
- [3] 樋口恵一, 山崎基浩, 河瀬理貴, 川本義海, 荒谷太郎, 間島隆博, 大窪和明. 緊急支援物資輸送の実態把握. Technical report, 土木計画学研究委員会, June 2024. 発表資料.
- [4] 浅田拓海, 井料隆雅, 浦田淳司, 佐津川功季, 力石真, 福田大輔, 山口裕通. 道路網被害と交通実態把握. Technical report, 土木計画学研究委員会, June 2024. 発表資料.
- [5] Erik Jenelius, Tomas Petersen, and Lars-Göran Mattsson. Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 40, No. 7, pp. 537–560, 2006.
- [6] Anthony Chen, Chao Yang, Sirisak Kongsomsaksakul, and Ming Lee. Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks. *Networks and Spatial Economics*, Vol. 7, pp. 241–256, 2007.
- [7] 久貝壽之. パーコレーション理論を応用した地区レベル道路網の防災性能評価. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 66, No. 548, pp. 241–248, 2001.
- [8] 久貝壽之, 加藤孝明. 通行可能確率分布を考慮した地区道路網の防災性能評価. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 72, No. 619, pp. 93–99, 2007.
- [9] 中山晶一郎, 小林俊一, 山口裕通. 道路ネットワークの連結性の定量化とその最適補強問題. 土木学会論文集 D3, Vol. 77, No. 3, 2021.
- [10] 中南孝晶, 中山晶一郎, 小林俊一, 山口裕通. 固有値解析による固有ベクトルを利用した緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価. 土木学会論文集 D3, Vol. 74, No. 5,

- 2018.
- [11] Miroslav Fiedler. Algebraic connectivity of graphs. *Czechoslovak Mathematical Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 298–305, 1973.
 - [12] 国土交通省. 国土数値情報（緊急輸送道路）. <https://nlftp.mlit.go.jp>, 2025. 国土交通省 国土数値情報ダウンロードサービス.
 - [13] Openstreetmap. <https://www.openstreetmap.org>, 2025. © OpenStreetMap contributors, Open Database License (ODbL).
 - [14] QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association, 2026.
 - [15] Peixoto, Tiago P. *graph-tool: An Efficient Python Module for Manipulation and Statistical Analysis of Graphs*. graph-tool Project, 2026.
 - [16] 国土地理院. ハザードマップポータルサイト. <https://disaportal.gsi.go.jp/>, 2024. 最終閲覧日: 2025-04-28.
 - [17] 国土交通省. 土砂災害防止法の概要. 国土交通省資料（PDF）, 2026. 土石流に関する警戒区域指定制度を参照, 最終閲覧日: 2026-01-19.
 - [18] 国土交通省. 津波浸水想定の設定の手引き. 国土交通省資料（PDF）, 2023. 津波防災地域づくりに関する法律に基づく津波浸水想定の設定方法を参照, 最終閲覧日: 2026-01-19.
 - [19] 国土地理院. 令和 6 年（2024 年）能登半島地震に関する情報 斜面崩壊・堆積分布データ. https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html, 2024. 2024 年 1 月 4 日公表, 1 月 22 日更新, 最終閲覧日: 2025-09-12.
 - [20] 林幸雄, 谷澤俊弘, 鬼頭朋見, 岡本洋. Python と複雑ネットワーク分析：関係性データからのアプローチ. 近代科学社, 2019.
 - [21] Nicolas Eliou. The interaction between road network and natural landscape. In *Sustainable Development and Planning III*, pp. 497–506. WIT Press, 2007.
 - [22] Marc Barthélemy. Spatial networks. *Physics Reports*, Vol. 499, No. 1–3, pp. 1–101, 2011.
 - [23] Nai Yang, Le Jiang, Yi Chao, Yang Li, and Pengcheng Liu. Influence of relief degree of land surface on street network complexity in china. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 10, No. 10, p. 705, 2021.
 - [24] Xiaoyu Gu. Exploring the impacts of topography on characteristics of road networks: A global analysis. *Cities*, Vol. 149, p. 104843, 2025.
 - [25] 全日本トラック協会, 石川県トラック協会. 令和 6 年能登半島地震 緊急支援物資輸送

- 等活動記録 ― 県民の命を繋ぐライフライン ―. 全日本トラック協会, 3 2025.
- [26] 内閣府 防災担当. 物資調達・輸送について. 令和 6 年能登半島地震を踏まえた災害対応検討ワーキンググループ (第 4 回) 資料, August 2024. 2024 年 8 月 20 日 (火).
- [27] 草薙真一, 橋本悟. インフラ・レジリエンス. 中央経済社, 5 2025.
- [28] 木下誠也. 地域防災とライフライン防護. コロナ社, 10 2018.
- [29] 国土交通省. 道路: 緊急輸送道路. 国土交通省ウェブサイト, 2026. 「緊急輸送道路とは」および「利用特性による区分」を参照, 最終閲覧日: 2026-01-19.
- [30] 国土交通省. 重要物流道路制度の概要. 国土交通省公式ウェブサイト, 2024. 最終閲覧日: 2026-01-19.
- [31] 国土交通省 国土政策局. 半島地域の活性化に資する施策の推進. 政策レビュー評価書, 国土交通省, March 2024.
- [32] OpenStreetMap contributors. Planet dump retrieved from openstreetmap. OpenStreetMap Foundation, 2026. Open Database License (ODbL), 最終閲覧日: 2026-01-19.
- [33] 国土交通省. 国土数値情報 行政区域データ (n03). 国土数値情報ダウンロードサイト. 最終閲覧日: 2026-01-20.
- [34] 国土地理院. ハザードマップポータルサイト: オープンデータ配信. 国土地理院ウェブサイト, n.d. 「重ねるハザードマップ」等のタイル形式データ (PNG) 配信に関する案内, 最終閲覧日: 2026-01-20.
- [35] 国土地理院. 地理院タイルについて (地理院タイルの仕様). 地理院地図ヘルプ. XYZ 方式, ズームレベル・タイル座標 (z/x/y), Web Mercator 投影, タイル原点 (北西) 等の仕様説明. 最終閲覧日: 2026-01-20.
- [36] 国土交通省. 洪水浸水想定区域図作成マニュアル. 国土交通省 水管理・国土保全局, 2023. 想定最大規模降雨に基づく洪水浸水想定区域の作成方法を参照, 最終閲覧日: 2026-01-19.
- [37] 国土地理院. 令和 6 年 (2024 年) 能登半島地震に関する情報 (斜面崩壊・堆積分布データ). 国土地理院 防災関連情報, 2024. 斜面崩壊・堆積分布データの説明およびダウンロード案内を参照, 最終閲覧日: 2026-01-20.
- [38] 国土地理院. 令和 6 年 (2024 年) 能登半島地震に関する情報: 空中写真判読による津波浸水域 (推定). ウェブページ (GeoJSON/PDF データ掲載), 2024. 「空中写真判読による津波浸水域 (推定)」節を参照 (1 月 2 日・5 日・11 日・14 日・17 日撮影空中写真から判読), 最終閲覧日: 2026-01-20.

付録 A

詳細なデータ

A.1 道路データ

A.1.1 緊急輸送道路

緊急輸送道路とは、大規模災害発生時において、人命救助活動、医療救護活動、および救援物資等の緊急輸送を迅速かつ確実にを行うことを目的として、国の防災基本計画に基づき、各自治体が地域防災計画において指定した道路網である。災害時には優先的な道路啓開や応急復旧の対象となる。多くの自治体では、輸送機能の重要度に応じて一次・二次・三次路線などの階層構造を設けており、広域防災拠点や医療拠点と被災地を結ぶ基幹輸送路から、地域内の補助的輸送路までを体系的に構成している。このように、緊急輸送道路は、災害対応フェーズにおける物資輸送および救急活動を支える基盤的インフラとして重要な役割を担っている [29]。

A.1.2 重要物流道路

重要物流道路とは、国土交通省が物流の観点から平常時および災害時を問わず、安定的な貨物輸送を確保するために選定した道路輸送網を指す。この制度は、2018年（平成30年）の道路法等の一部改正によって創設され、全国的な貨物輸送網の形成と物流の円滑化を目的としている。重要物流道路として指定された区間は、物流機能の強化や重点的な支援施策の対象となり、国土交通大臣による機能強化の推進が図られる。また、災害時においては、重要物流道路やその代替・補完路が災害対応の優先対象とされることで、啓開や復旧が迅速化されることが期待されている。さらに、重要物流道路の指定により構造基準が引き上げられ、国際海上コンテナ車（40ft 背高）などの大型貨物車両が特別な許可なく



図 A.1: 緊急輸送道路

通行可能な区間も整備されつつある。このように、重要物流道路は、平常時の物流効率と災害時の物流レジリエンスの両面から、日本の道路交通ネットワークにおける基幹的役割を担っている [30].

A.1.3 半島循環道路

半島循環道路とは、半島地域において、半島部の主要集落や港湾、観光拠点等を連結し、半島内部および半島外部との交通機能を確保することを目的として整備が進められている骨格的道路ネットワークである。多くの半島地域では、地形的制約により道路網が放射状または単一路線に依存しやすく、災害時には孤立リスクが高まりやすいという課題が指摘されている。このため、国の半島振興施策においては、半島内を周回あるいは縦断・横断的に結ぶ循環型ネットワークの形成が重要な整備方針として位置づけられている。半島循環道路は、平常時には地域間移動や観光・物流の円滑化に寄与するとともに、災害時には代替経路の確保や孤立集落の発生抑制といったレジリエンス向上の観点からも重要な役割を担っている [31].



図 A.2: 重要物流道路



図 A.3: 半島循環道路

A.1.4 OpenStreetMap の道路データ

OpenStreetMap (OSM) の道路データとは、世界中のボランティアおよび組織によって協働的に整備・更新されているオープンな地理空間データベースに基づく道路ネットワーク情報である。OSM では、道路は線形データとして記述され、道路種別、通行属性、一方通行情報などの属性が付与されている。データは Open Database License (ODbL) の下で公開されており、研究利用を含む二次利用が可能である。近年では、災害対応や都市計画、交通解析など幅広い分野で利用が進んでおり、行政データが十分に整備されていない地域においても比較的高い網羅性を有する点が特徴である。本研究では、全国規模で一貫した形式の道路ネットワークを構築可能である点に着目し、有効な道路データソースとして OSM 道路データを利用している [32]。

OSM の道路データは、QGIS の QuickOSM プラグインを用いて Overpass API 経由で取得したものであり、Open Database License (ODbL) 1.0 に基づいて利用している。本研究で用いる地図表現および解析結果は OSM データから派生した生成物 (Produced Work) であり、© OpenStreetMap contributors に帰属を明示した上で利用している。QuickOSM で取得した OSM 道路データの抽出条件は表 A.1 に示す。その結果得られた道路データは図 A.4 に示す。なお QuickOSM では都道府県の指定はできないため、取得後に行政区分データ [33] を用いて石川県域でクリップした。

本研究では、道路機能が比較的高い幹線系の道路を中心にネットワークを構築するため、highway タグは表 A.1 に示すカテゴリ (motorway~unclassified および各 *_link) に限定して取得した。一方、residential (住宅地内道路) や cycleway, footway, pedestrian, path 等の生活道路・歩行者/自転車系の道路、ならびに車両通行を前提としない路線は解析対象から除外した。ただし、unclassified は本来ローカル道路を含み得るが、幹線道路が災害等で寸断された際に自動車の迂回路として機能し得る区間を含む可能性があるため、本研究では例外的に取得対象に含めた。

表 A.1: QuickOSM で取得した OSM 道路データの抽出条件 (highway タグ)

| OSM タグ (highway=) | 日本語表現 (目安) | 補足 (意味・典型例) |
|-------------------|------------------------|---|
| motorway | 高速道路 (自動車専用) | 原則として自動車専用の高規格道路 (例: 高速自動車国道等). |
| motorway_link | 高速道路の連絡路 (ランプ) | link は本線への出入口・接続路 (IC/JC のランプ, 合流・分岐路など). |
| motorway_junction | 高速道路のジャンクション/ IC (ノード) | junction は高速道路の出入口等を表す要素であり, 線ではなく点 (ノード) として付与されることが多い. |
| trunk | 幹線道路 (高規格) | 高速道路ではないが高規格な幹線 (国道バイパス等を含む場合がある). |
| trunk_link | 幹線道路の連絡路 | trunk 本線への接続路 (立体交差のランプ等). |
| primary | 主要幹線道路 | 地域内外を結ぶ主要道路 (国道等が多いが, 国により運用差あり). |
| primary_link | 主要幹線道路の連絡路 | primary 本線への接続路 (立体交差のランプ等). |
| secondary | 準幹線道路 | 都市間・地域内交通を支える道路 (主要地方道等が多い). |
| secondary_link | 準幹線道路の連絡路 | secondary 本線への接続路. |
| tertiary | 地域の主要道路 | 市町村内の骨格道路・主要な生活道路. |
| tertiary_link | 地域主要道路の連絡路 | tertiary 本線への接続路. |
| unclassified | 一般道路 (分類なし) | 一般道路 (分類なし) を表すカテゴリで, ローカル道路を含み得る. 本研究では, 幹線道路の寸断時に迂回路として機能し得る区間を含む可能性を考慮し, 例外的に取得対象に含めた. |

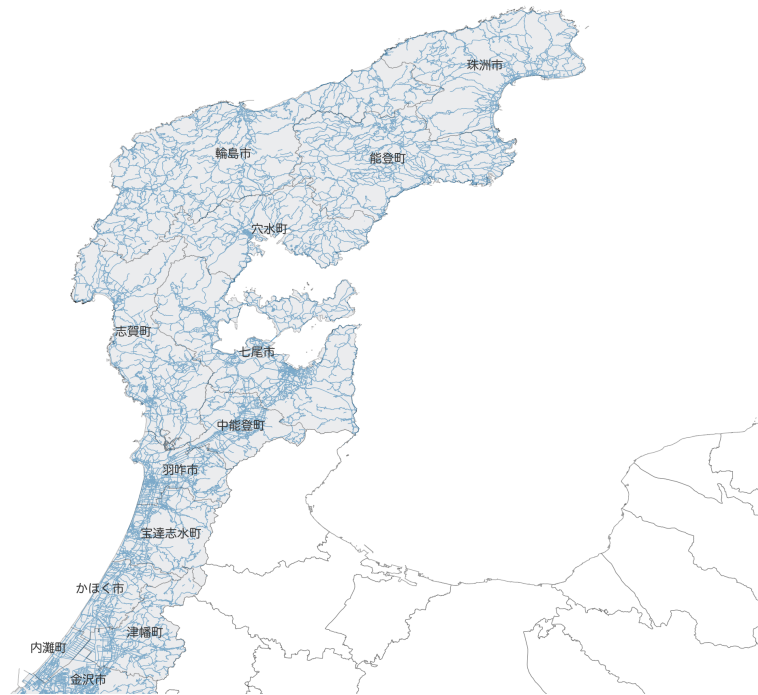


図 A.4: OpenStreetMap の道路

A.2 ハザードマップ

ハザードマップデータは国土地理院のハザードマップポータルサイト [34] から取得した。

本研究で用いるハザードマップは、同サイトが提供するラスタタイル (PNG) をズームレベル z とタイル座標 (x, y) で指定して取得し、解析に用いる GeoTIFF へ結合した。タイル画像は次の形式の URL で配信されている。

`https://disaportaldata.gsi.go.jp/raster/<layer>/<pref>/z/x/y.png` (A.1)

ここで `<layer>` はハザード種別 (例: 洪水浸水想定区域), `<pref>` は都道府県コード (2桁), z はズームレベル, (x, y) は国土地理院が採用する XYZ 方式のタイル座標である。XYZ 方式では、ズームレベルに応じて地図画像が格子状に分割され、各タイルが一意の (z, x, y) によって識別される [35]。

ハザードマップデータは、以下の手順により都道府県単位で取得および結合処理を行った。

1. 入力データとして、都道府県境界 GeoJSON (行政区域データ N03) [33], 取得対象レイヤ (例: `flood1`), およびズームレベル z を指定する。
2. 都道府県境界ポリゴンの外接矩形 (最小・最大緯度経度) を算出する。
3. 外接矩形の四隅座標をタイル座標 (x, y) に変換し、必要なタイル取得範囲 $x_{\text{start}} \sim x_{\text{end}}, y_{\text{start}} \sim y_{\text{end}}$ を決定する。
4. 決定した範囲内の PNG タイルを順次ダウンロードする。この際、欠損タイルはスキップし、サーバ負荷軽減のため取得間隔にウェイトを挿入する。
5. 取得した PNG タイルに地理参照情報を付与し、モザイク処理を行う。
6. モザイク結果を GeoTIFF 形式として保存する。

以下に、本研究で利用検討した各ハザードマップデータの概要を示す。

A.2.1 土砂災害警戒区域 (土石流)

土砂災害警戒区域 (土石流) とは、土砂災害防止法 (正式名称: 土砂災害防止法等に基づく土砂災害警戒区域等に関する法律) に基づき、都道府県が指定する区域のうち、土石流の発生により住民の生命または身体に危害が生ずるおそれがあると認められる区域である。主に溪流沿いや扇状地部に設定され、地形条件や過去の災害履歴、流域特性などを踏

まえて指定される。警戒区域内では、避難体制の整備や警戒情報の周知が図られるとともに、自治体による防災対策の重点化が行われる。このように、土砂災害警戒区域（土石流）は、土石流災害による人的被害の軽減を目的としたリスク情報として位置づけられている [17].

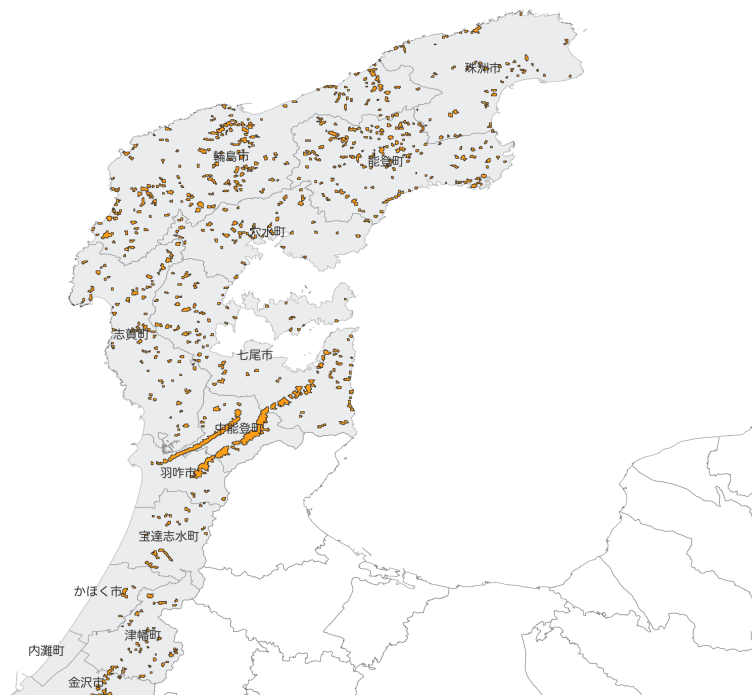


図 A.5: 土砂災害警戒区域（土石流）

A.2.2 土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）

土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）とは、土砂災害防止法（正式名称：土砂災害警戒区域等に関する法律）に基づき、都道府県が指定する区域のうち、急傾斜地の崩壊により住民の生命または身体に危害が生ずるおそれがあると認められる区域である。主に傾斜角度の大きい斜面や住宅地背後の斜面部などに設定され、地形条件、地質特性、降雨条件、過去の災害履歴等を踏まえて指定される。警戒区域内では、警戒避難体制の整備や住民への情報提供が図られる。このように、土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）は、斜面崩壊災害による人的被害の軽減を目的としたリスク情報として位置づけられている [17].

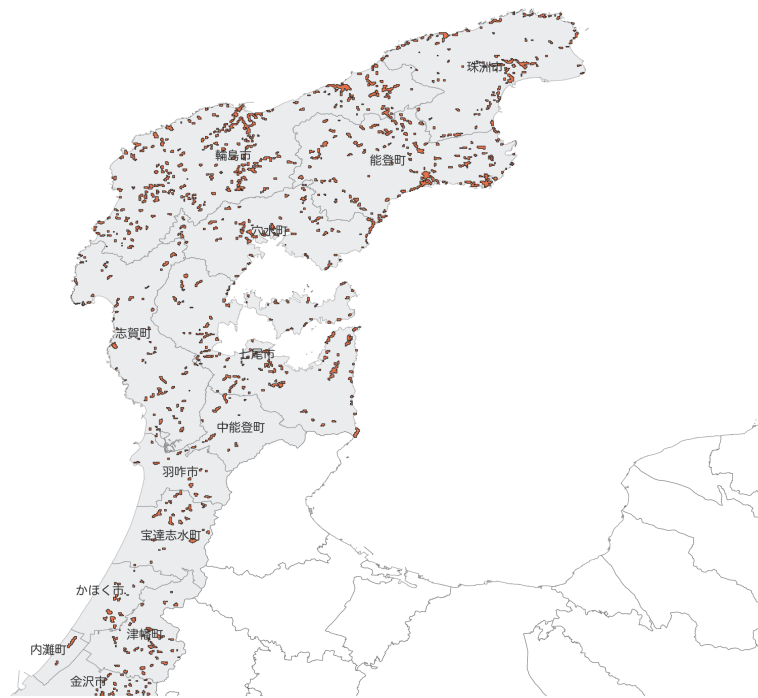


図 A.6: 土砂災害警戒区域（急傾斜地の崩壊）

A.2.3 土砂災害警戒区域（地すべり）

土砂災害警戒区域（地すべり）とは、土砂災害防止法（正式名称：土砂災害警戒区域等に関する法律）に基づき、都道府県が指定する区域のうち、地すべり現象の発生により住民の生命または身体に危害が生ずるおそれがあると認められる区域である。主に緩傾斜地や地質的にすべりやすい層を有する斜面部に設定され、地形条件、地質構造、地下水条件、過去の地すべり履歴などを踏まえて指定される。警戒区域内では、警戒避難体制の整備や住民への情報提供が図られる。このように、土砂災害警戒区域（地すべり）は、地すべり災害による人的被害の軽減を目的としたリスク情報として位置づけられている [17].

A.2.4 洪水浸水想定区域（想定最大規模）

洪水浸水想定区域（想定最大規模）とは、水防法に基づき、国または都道府県が指定する河川について、想定し得る最大規模の降雨による洪水を対象として、氾濫が発生した場合に浸水が想定される区域を示したものである。想定最大規模の洪水は、おおむね数百年

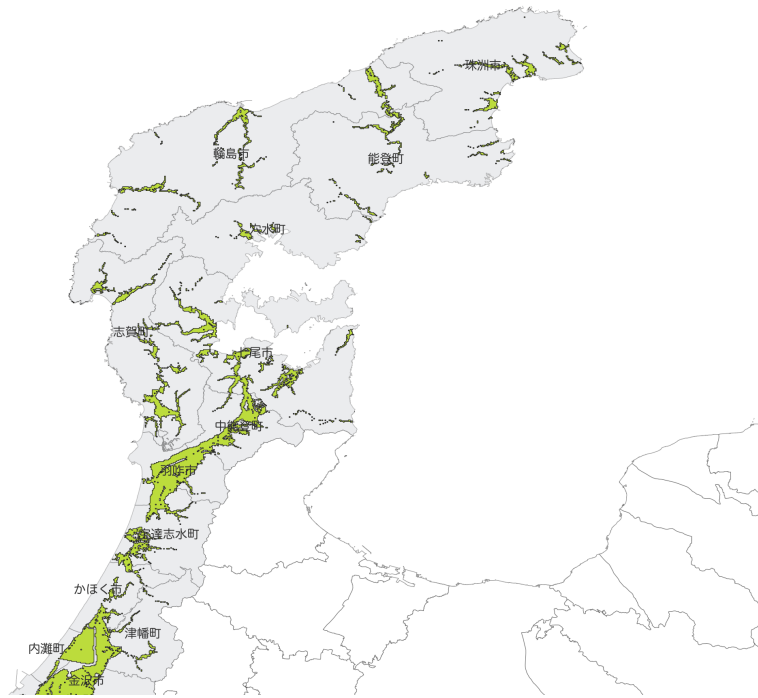


図 A.8: 洪水浸水想定区域 (想定最大規模)

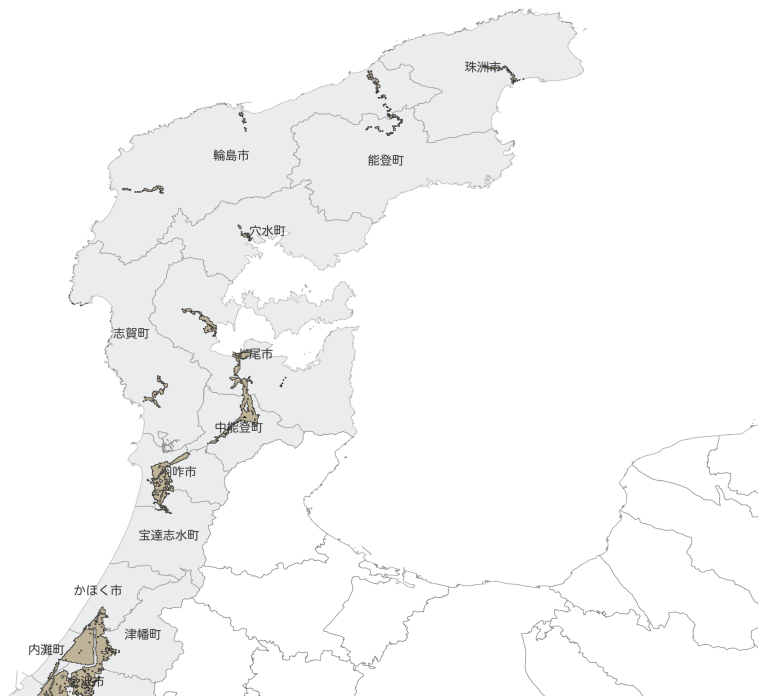


図 A.9: 洪水浸水想定区域 (計画規模)

A.2.6 浸水継続時間（想定最大規模）

浸水継続時間（想定最大規模）とは、水防法に基づき作成される洪水浸水想定区域図において、想定し得る最大規模の降雨による洪水を対象として、浸水が発生した地点において水が引くまでに要すると想定される時間を示した情報である。浸水継続時間は、地形条件、河川構造、排水能力、氾濫水の滞留特性などを考慮した水理解析結果に基づいて算定される。この指標は、建物被害の拡大リスクやライフライン復旧の難易度、長期避難の必要性などを評価する上で重要な情報であり、避難計画の策定や復旧・復興計画の検討における基礎資料として活用されている [36]。

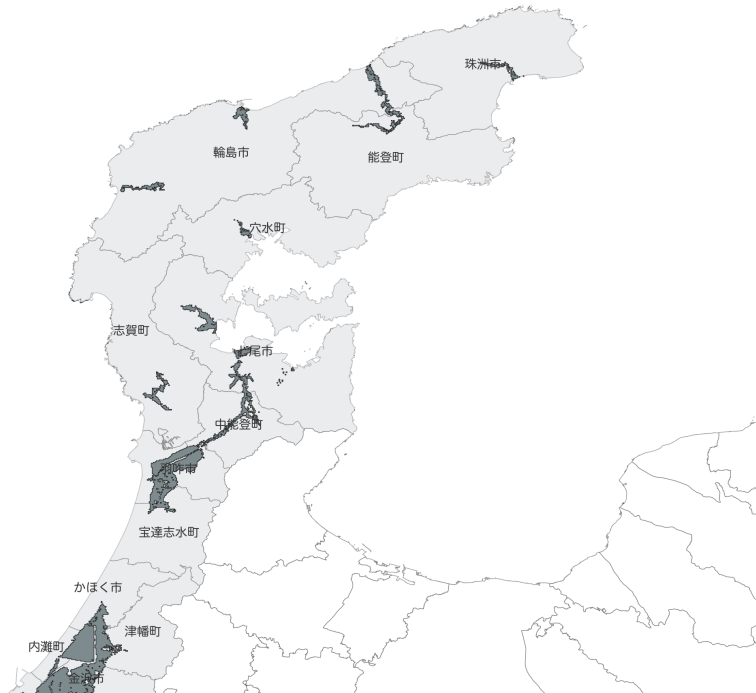


図 A.10: 浸水継続時間（想定最大規模）

A.2.7 家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流）

家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流）とは、水防法に基づき作成される洪水浸水想定区域図の一部として、想定し得る最大規模の降雨による洪水を対象に、堤防決壊や越水等に伴う急激な氾濫流の発生によって、木造家屋等の倒壊や流失が生じるおそれがある区域を示

したものである。本区域は、氾濫流の流速や水深、地形条件などを考慮した水理解析結果に基づいて設定され、人的被害の発生リスクが特に高い区域として位置づけられる。この情報は、避難判断の高度化や居住誘導施策、土地利用規制の検討などに活用され、洪水時における甚大被害の回避を目的とした重要なリスク指標となっている [36]。



図 A.11: 家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流）

A.2.8 家屋倒壊等氾濫想定区域（河岸侵食）

家屋倒壊等氾濫想定区域（河岸侵食）とは、水防法に基づき作成される洪水浸水想定区域図の一部として、想定し得る最大規模の降雨による洪水を対象に、河岸の侵食や洗掘の進行によって堤防や宅地基盤が不安定化し、家屋の倒壊や流失が生じるおそれがある区域を示したものである。本区域は、河岸付近の流速分布や河床変動特性、地盤条件などを考慮した水理解析および地形条件の評価結果に基づいて設定される。この情報は、居住地の安全性評価や土地利用計画の検討、避難計画の高度化などに活用され、河岸侵食に起因する甚大被害の回避を目的とした重要なリスク指標として位置づけられている [36]。



図 A.13: 内水（雨水出水）浸水想定区域

植生条件，積雪特性，過去の雪崩発生履歴などを踏まえて設定されている．雪崩危険箇所は，防災施設整備の優先順位付けや警戒体制の構築，冬期道路管理計画の策定等に活用され，雪崩災害による人的被害および交通寸断リスクの低減を目的とした基礎的なリスク情報として位置づけられている．

A.2.11 津波浸水想定区域

津波浸水想定区域とは，津波防災地域づくりに関する法律に基づき，都道府県知事が設定・公表する「津波浸水想定」において，最大クラスの津波が発生した場合に浸水が想定される区域を示したものである．津波浸水想定は，想定震源域に基づく津波浸水シミュレーションにより，最大の浸水範囲や浸水深等を算定して設定される．この情報は，津波災害警戒区域等の指定や避難計画の策定，防災教育・啓発などに活用され，津波による人的被害の軽減を目的とした基礎的なリスク情報として位置づけられている [18]．



图 A.14: 雪崩危険箇所

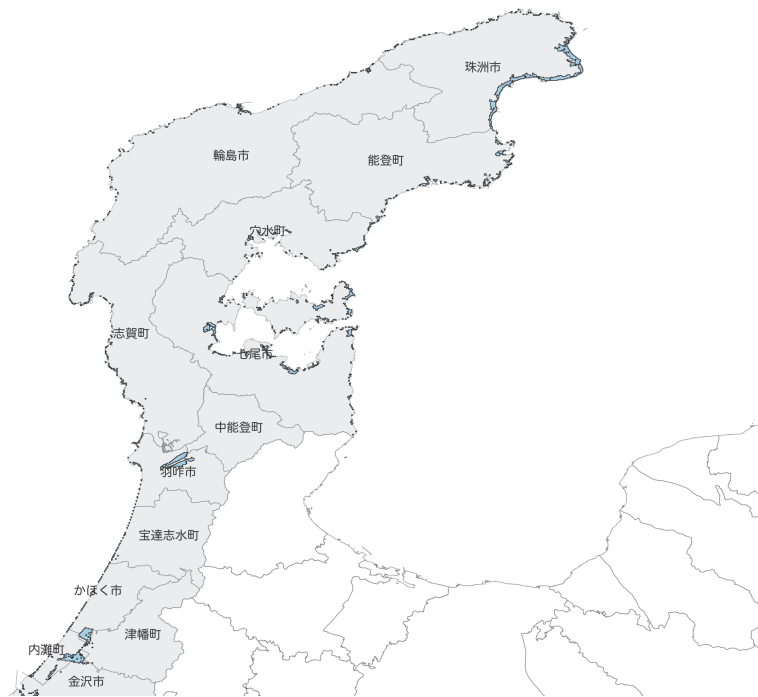


图 A.15: 津波浸水想定区域

A.3 令和6年能登半島地震の実災害データ

A.3.1 斜面崩壊・堆積分布

斜面崩壊・堆積分布データとは、令和6年能登半島地震（2024年1月1日）に伴って生じたと考えられる斜面崩壊地および土砂堆積箇所の範囲について、国土地理院が空中写真（正射画像）を用いた判読により作成した地理空間データである。対象は珠洲地区、輪島東地区、輪島中地区、輪島西地区、穴水地区、七尾地区であり、地区ごとに2024年1月2日、5日、11日、14日、17日に撮影された空中写真を用いて判読（必要に応じて再判読）している。また、道路や河川上の土砂は一部撤去されている可能性がある点に留意が必要である。本研究では、実災害における斜面崩壊・堆積の空間分布を表す基礎データとして、当該データを用いる [37]。

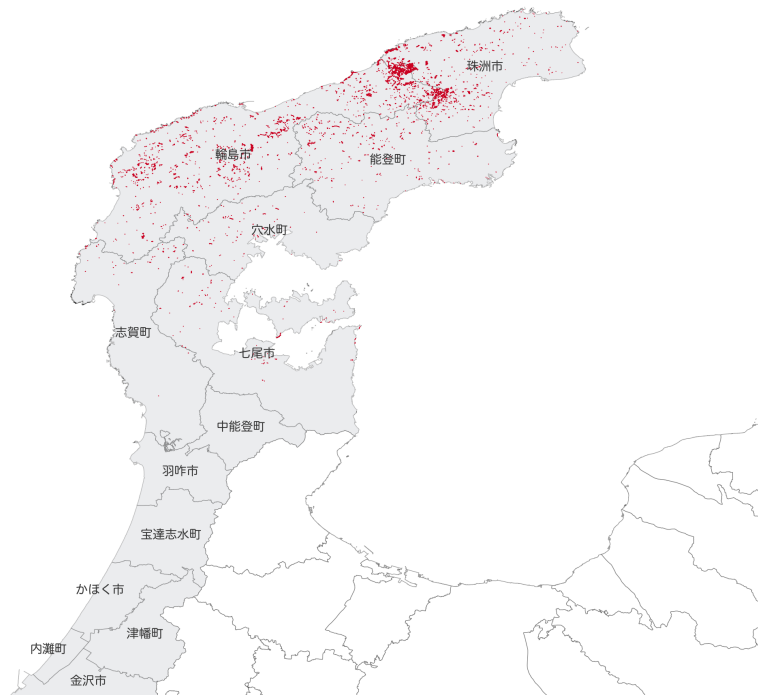


図 A.16: 斜面崩壊・堆積分布

A.3.2 空中写真判読による津波浸水域（推定）

空中写真判読による津波浸水域（推定）とは、令和6年能登半島地震（2024年1月1日）に伴って発生したと考えられる津波の到達範囲について、国土地理院が空中写真から作成した地理空間データである。本データは、国土地理院が2024年1月2日、5日、11日、14日、17日に撮影した空中写真（珠洲地区、輪島東地区、輪島西地区、穴水地区、七尾地区）を用いて、到達範囲（堤外地を含む）を判読し、一部は再判読して作成されている。なお、海岸線は空中写真（正射画像）に合わせて取得されているため、地形図と整合しない箇所があり得る点に留意が必要である。本研究では、実災害における津波到達範囲の空間分布を表す基礎データとして、当該データを用いる [38]。



図 A.17: 空中写真判読による津波浸水域（推定）

付録 B

実験結果の詳細なデータ

B.1 脆弱度平均値の 2 倍を閾値とした場合

B.1.1 ハザードマップに基づく適合率の比較

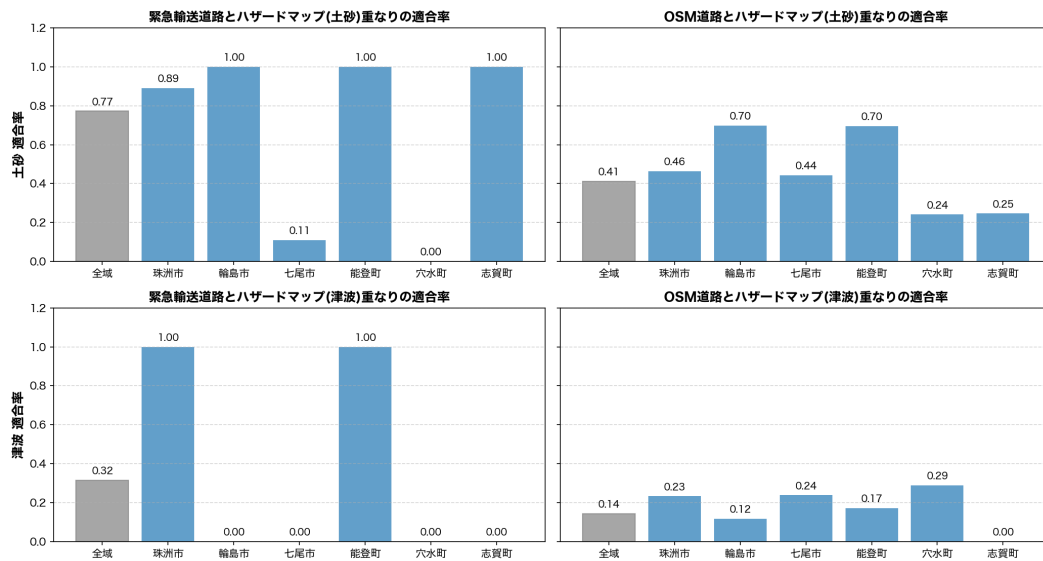


図 B.1: ハザードマップに基づく適合率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

表 B.1: ハザードマップに基づく適合率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 77.26 | 41.24 | 31.55 | 14.30 |
| 珠洲市 | 89.15 | 46.34 | 100.00 | 23.34 |
| 輪島市 | 100.00 | 69.74 | 0.00 | 11.78 |
| 七尾市 | 10.95 | 44.38 | 0.00 | 23.85 |
| 能登町 | 100.00 | 69.63 | 100.00 | 17.13 |
| 穴水町 | 0.00 | 24.15 | 0.00 | 28.86 |
| 志賀町 | 100.00 | 24.72 | 0.00 | 0.00 |

B.1.2 ハザードマップに基づく再現率の比較

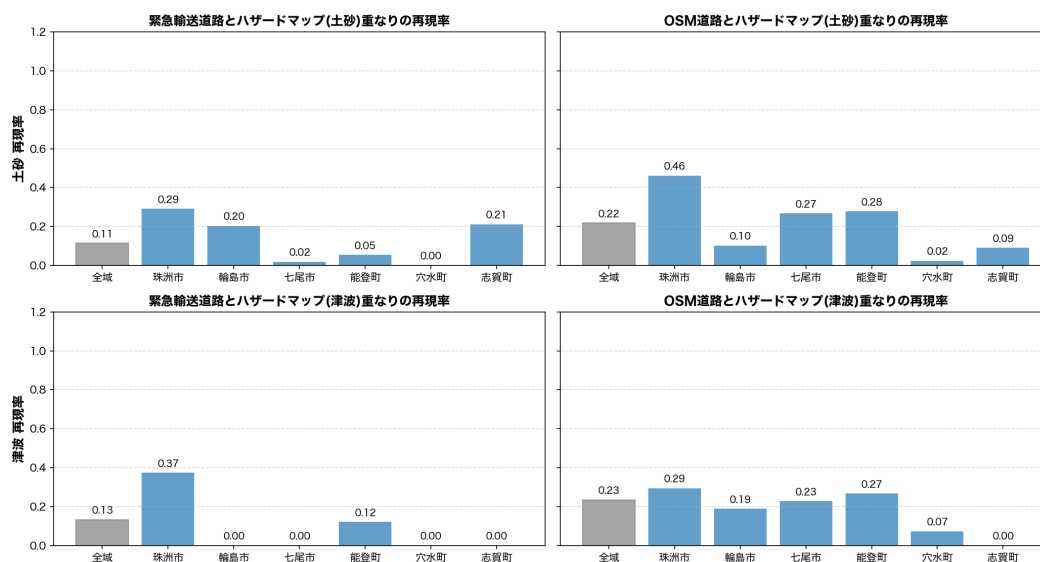


図 B.2: ハザードマップに基づく再現率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

表 B.2: ハザードマップに基づく再現率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 11.40 | 21.78 | 13.34 | 23.40 |
| 珠洲市 | 29.07 | 46.06 | 37.32 | 29.42 |
| 輪島市 | 20.36 | 10.30 | 0.00 | 18.90 |
| 七尾市 | 1.93 | 26.77 | 0.00 | 22.75 |
| 能登町 | 5.42 | 27.80 | 12.12 | 26.67 |
| 穴水町 | 0.00 | 2.39 | 0.00 | 7.31 |
| 志賀町 | 21.21 | 9.05 | 0.00 | 0.00 |

B.1.3 実災害データに基づく適合率の比較

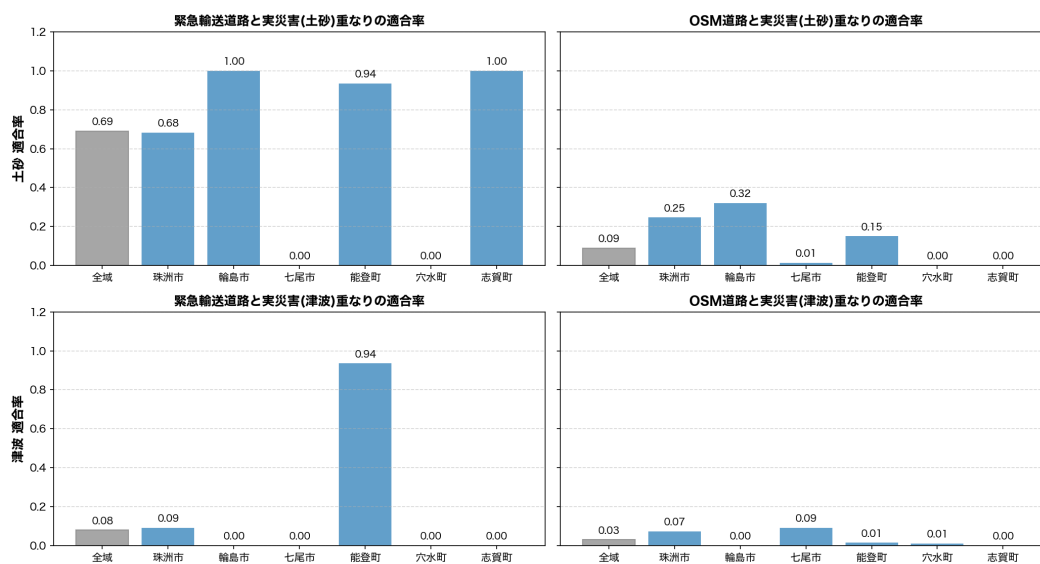


図 B.3: 実災害データに基づく適合率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

表 B.3: 実災害に基づく適合率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 69.06 | 9.00 | 7.92 | 3.04 |
| 珠洲市 | 68.21 | 24.67 | 9.12 | 7.27 |
| 輪島市 | 100.00 | 32.08 | 0.00 | 0.00 |
| 七尾市 | 0.00 | 1.46 | 0.00 | 9.04 |
| 能登町 | 93.55 | 15.08 | 93.55 | 1.47 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.98 |
| 志賀町 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

B.1.4 実災害データに基づく再現率の比較

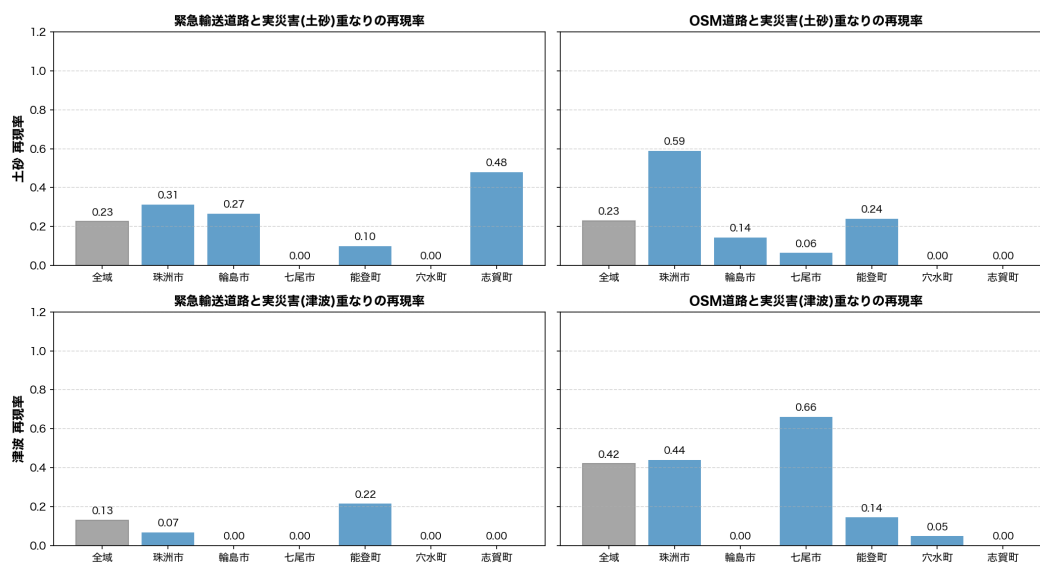


図 B.4: 実災害データに基づく再現率 (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

表 B.4: 実災害に基づく再現率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 2 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 22.63 | 23.00 | 13.09 | 42.07 |
| 珠洲市 | 31.38 | 58.88 | 6.75 | 43.93 |
| 輪島市 | 26.60 | 14.47 | 0.00 | 0.00 |
| 七尾市 | 0.00 | 6.46 | 0.00 | 66.07 |
| 能登町 | 10.00 | 24.03 | 21.52 | 14.47 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.83 |
| 志賀町 | 47.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

B.2 脆弱度平均値の5倍を閾値とした場合

B.2.1 ハザードマップに基づく適合率の比較

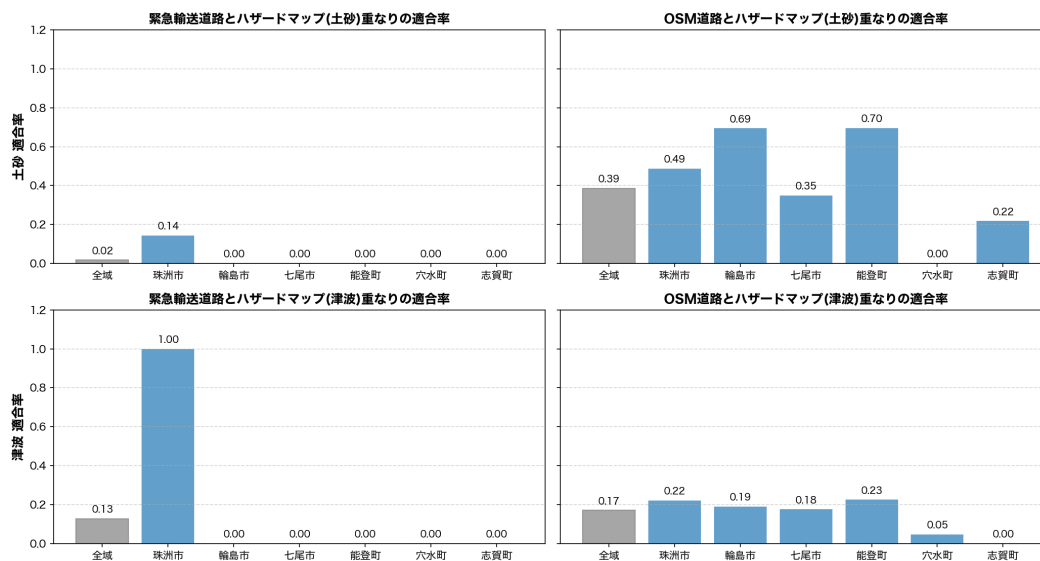


図 B.5: ハザードマップに基づく適合率 (脆弱度平均値の5倍を閾値)

表 B.5: ハザードマップに基づく適合率 (%) (閾値：脆弱度平均値の5倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 1.84 | 38.51 | 12.77 | 17.09 |
| 珠洲市 | 14.38 | 48.72 | 100.00 | 22.15 |
| 輪島市 | 0.00 | 69.40 | 0.00 | 18.92 |
| 七尾市 | 0.00 | 34.97 | 0.00 | 17.61 |
| 能登町 | 0.00 | 69.63 | 0.00 | 22.52 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.71 |
| 志賀町 | 0.00 | 21.86 | 0.00 | 0.00 |

B.2.2 ハザードマップに基づく再現率の比較

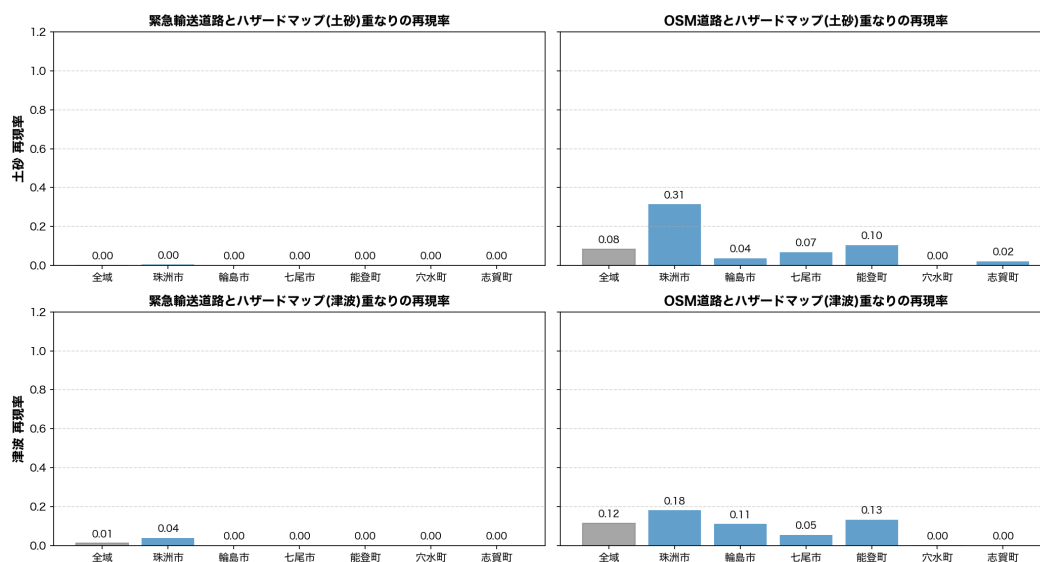


図 B.6: ハザードマップに基づく再現率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値)

表 B.6: ハザードマップに基づく再現率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 5 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全城 | 0.06 | 8.40 | 1.15 | 11.54 |
| 珠洲市 | 0.50 | 31.44 | 3.97 | 18.12 |
| 輪島市 | 0.00 | 3.73 | 0.00 | 11.06 |
| 七尾市 | 0.00 | 6.79 | 0.00 | 5.41 |
| 能登町 | 0.00 | 10.47 | 0.00 | 13.21 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.17 |
| 志賀町 | 0.00 | 2.14 | 0.00 | 0.00 |

B.2.3 実災害データに基づく適合率の比較

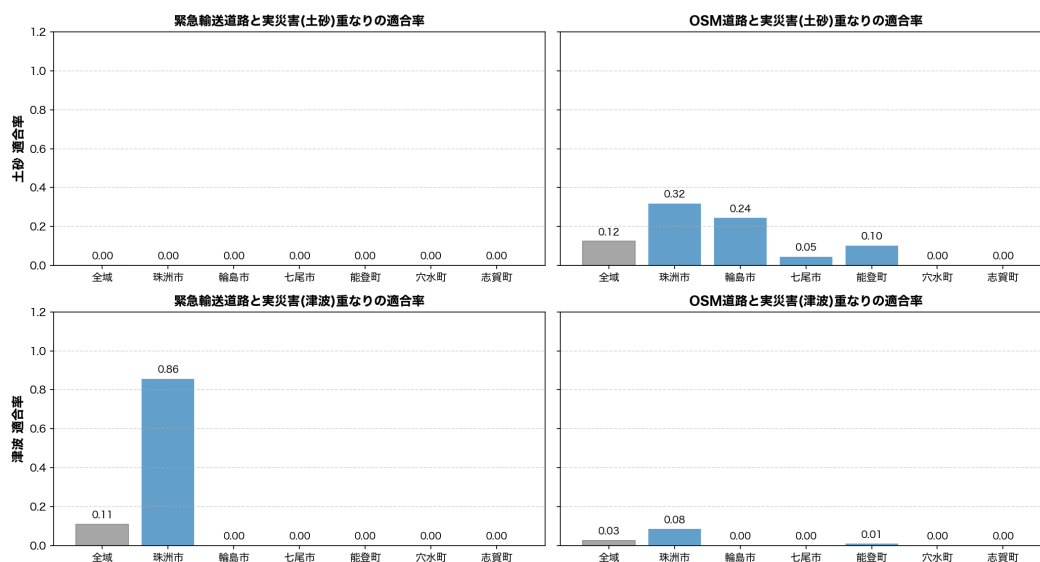


図 B.7: 実災害データに基づく適合率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値)

表 B.7: 実災害に基づく適合率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 5 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全域 | 0.00 | 12.47 | 10.93 | 2.57 |
| 珠洲市 | 0.00 | 31.83 | 85.62 | 8.47 |
| 輪島市 | 0.00 | 24.46 | 0.00 | 0.00 |
| 七尾市 | 0.00 | 4.55 | 0.00 | 0.00 |
| 能登町 | 0.00 | 10.28 | 0.00 | 0.95 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 志賀町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

B.2.4 実災害データに基づく再現率の比較

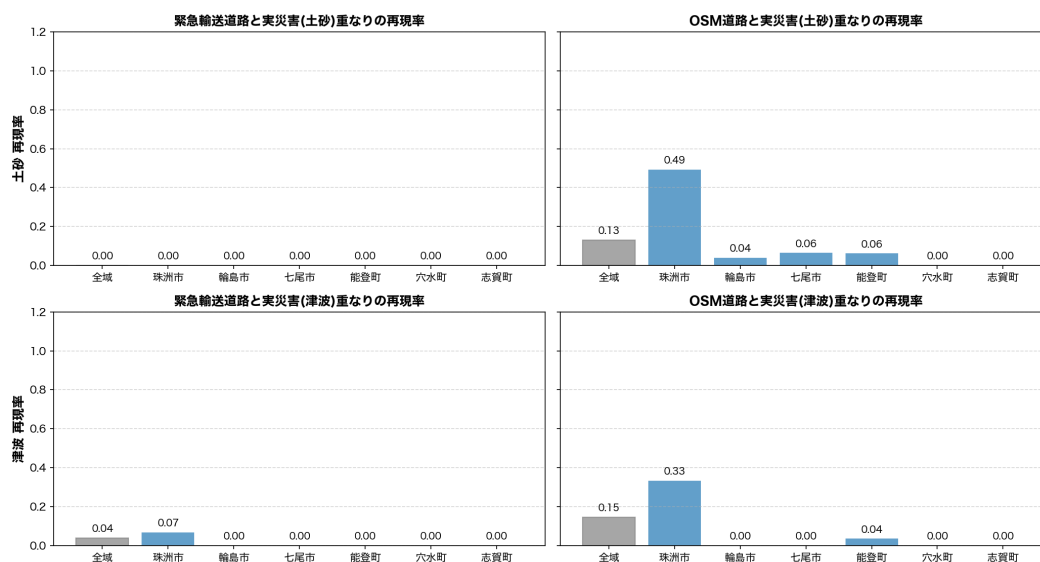


図 B.8: 実災害データに基づく再現率 (脆弱度平均値の 5 倍を閾値)

表 B.8: 実災害に基づく再現率 (%) (閾値：脆弱度平均値の 5 倍)

| 市町 | 緊急輸送道路 (土砂) | OSM 道路 (土砂) | 緊急輸送道路 (津波) | OSM 道路 (津波) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全城 | 0.00 | 13.16 | 3.86 | 14.68 |
| 珠洲市 | 0.00 | 49.33 | 6.75 | 33.25 |
| 輪島市 | 0.00 | 4.02 | 0.00 | 0.00 |
| 七尾市 | 0.00 | 6.46 | 0.00 | 0.00 |
| 能登町 | 0.00 | 6.17 | 0.00 | 3.52 |
| 穴水町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 志賀町 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

付録 C

ソースコード

本研究で用いたプログラム群のうち、提案手法の数理的処理およびアルゴリズムの中核となる部分のみを抜粋して示す。入出力処理，データ整形，ログ出力，例外処理，および可視化補助コードなどの周辺的な実装は，可読性および紙面制約の観点から省略している。本付録に示すコード断片は，提案手法の計算手順を再現可能な形で理解することを目的として掲載している。

C.1 道路ネットワーク構築処理

以下に，道路中心線データからノードおよびリンクを抽出し，重み付き無向グラフを構築する処理の中核部分を示す。リンク重みは道路長の逆数として定義される。

```
1 # extract endpoints and construct edge list
2 for geom in road_geometries:
3     u = get_start_point(geom)
4     v = get_end_point(geom)
5     length_ij = geom.length
6
7     nodes.add(u)
8     nodes.add(v)
9     edges.append((u, v, length_ij))
10
11 # initialize adjacency matrix
12 for (i, j, length_ij) in edges:
13     w_ij = 1.0 / length_ij
14     A[i, j] = w_ij
15     A[j, i] = w_ij
```

Listing C.1: 道路ネットワーク構築処理 (build_network_noto.py 抜粋)

C.2 ハザードマップ・タイル取得処理

以下に、国土地理院ハザードマップポータルサイトから配信されているラスタタイルを、都道府県単位で取得する処理の中核部分を示す。本処理では、行政区域データから算出した外接矩形を用いて必要なタイル範囲を決定し、指定したズームレベルにおけるPNG タイルを順次ダウンロードする。

```
1 def get_tile_bounds_from_geojson(geojson_path, zoom):
2     gdf = gpd.read_file(geojson_path)
3     minx, miny, maxx, maxy = gdf.total_bounds
4     ul = mercantile.tile(minx, maxy, zoom)
5     lr = mercantile.tile(maxx, miny, zoom)
6     return ul.x, lr.x, ul.y, lr.y
7
8 # build tile URL template
9 x_start, x_end, y_start, y_end = get_tile_bounds_from_geojson(geojson_path, zoom)
10
11 tile_url_template=
12 f"https://disaportaldata.gsi.go.jp/raster/{data_type_folder}/{pref_code}/{z}/{x}/{y}.png"
13
14 # download and merge tiles
15
16 download_and_merge_tiles(
17     z=zoom,
18     x_start=x_start,
19     x_end=x_end,
20     y_start=y_start,
21     y_end=y_end,
22     tile_url_template=tile_url_template,
23     output_file=str(output_file)
24 )
```

Listing C.2: ハザードマップタイル取得処理 (download_pref_tiles.py 抜粋)

C.3 ラスタタイル結合および GeoTIFF 生成処理

以下に、取得した複数の PNG タイル画像をモザイク処理し、地理参照情報を付与した GeoTIFF として保存する処理の中核部分を示す。この処理は download_pref_tiles.py から呼び出され、解析に直接利用可能なラスタ形式データを生成する。

```
1 # create mosaic and georeference
2 with rasterio.open(tile_files[0]) as src0:
3     meta = src0.meta.copy()
4
5 meta.update({
6     "driver": "GTiff",
7     "height": mosaic.shape[1],
8     "width": mosaic.shape[2],
9     "transform": out_trans
10 })
11
```

```

12 with rasterio.open(output_file, "w", **meta) as dest:
13     dest.write(mosaic)

```

Listing C.3: タイル結合および GeoTIFF 生成処理 (download_geotiff.py 抜粋)

C.4 災害影響道路区間抽出処理

以下に、ハザードポリゴンと道路ネットワークを空間的に重ね合わせ、災害の影響を受ける道路区間を抽出する処理の中核部分を示す。本処理により、災害後ネットワークを構成するための除去対象リンク集合が生成される。

```

1 # spatial intersection test between roads and hazard polygons
2 for edge in road_edges:
3     if edge.geometry.intersects(hazard_polygon):
4         disrupted_edges.add(edge.id)

```

Listing C.4: 災害影響道路区間抽出処理 (extract_disrupted_roads_noto.py 抜粋)

C.5 道路ネットワークのラプラシアン行列計算

```

1 # edge weight definition (inverse road length)
2 for (i, j, length_ij) in edges:
3     w_ij = 1.0 / length_ij
4     A[i, j] = w_ij
5     A[j, i] = w_ij
6
7 # degree matrix
8 for i in nodes:
9     D[i, i] = sum(A[i, :])
10
11 # normalized Laplacian matrix
12 L = D - A
13 L_norm = D^{-1/2} @ L @ D^{-1/2}
14
15 # eigen decomposition
16 eigenvalues, eigenvectors = eigh(L_norm)
17
18 lambda2 = eigenvalues[1]           # algebraic connectivity
19 fiedler = eigenvectors[:, 1]       # Fiedler vector
20
21 # link-level vulnerability (criticality)
22 for (i, j) in edges:
23     v_ij = abs(fiedler[i] - fiedler[j])
24     criticality[(i, j)] = v_ij

```

Listing C.5: 正規化ラプラシアン行列と脆弱度算出処理 (抜粋)

C.6 災害シナリオに基づく連結性再評価処理

以下に、災害影響を受けた道路区間を除去した後のネットワークに対して、再度ラプリアン行列を構築し、連結性指標 λ_2 を再計算する処理の中核部分を示す。本処理により、災害発生前後におけるネットワーク連結性の変化を定量化する。

```
1 # remove disrupted edges from graph
2 for eid in disrupted_edges:
3     graph.remove_edge(eid)
4
5 # recompute normalized Laplacian
6 L_after = D_after - A_after
7 L_norm_after = D_after^{-1/2} @ L_after @ D_after^{-1/2}
8
9 # eigen decomposition
10 vals_after, _ = eigh(L_norm_after)
11
12 lambda2_after = vals_after[1]
```

Listing C.6: 災害シナリオに基づく連結性再評価処理 (simulate_criticality_noto.py 抜粋)

付録 D

実行環境構築

以下の 2 環境について、付録 C に示したソースコードを実行するための実行環境構築手順を示す。

- Mac: Docker
- KAGAYAKI: Singularity

D.1 Mac: Docker

本研究で使用した Mac と Docker のバージョン情報を以下に示す。

- iMac (Apple M3 24GB, 2023)
- Docker Desktop: 4.48.0 (207573)
- Docker Engine: 28.5.1
- Docker Compose: v2.40.2-desktop.1
- Credential Helper: v0.9.4
- Kubernetes: v1.34.1

D.1.1 イメージビルド

- Dockerfile を用意：

```
1  
2 FROM --platform=linux/amd64 tiagopeixoto/graph-tool  
3  
4 RUN pacman -Sy --noconfirm archlinux-keyring \
```

```

5  && pacman -Syu --noconfirm --needed \
6  python python-pip python-setuptools \
7  proj geos gdal spatialindex \
8  python-geopandas python-shapely python-pyproj python-fiona python-rtree \
9  && pacman -Scc --noconfirm
10
11 # pip install 時に --break-system-packages を追加
12 RUN pip install --no-cache-dir --break-system-packages rasterio

```

- ビルド実行：

```
1 docker build -t graph-tool-geopandas -f Dockerfile .
```

D.1.2 コンテナ実行例

```

1 docker run --rm --platform linux/amd64 \
2   -v /Users/USERNAME/Documents/GitHub/network-analysis:/data \
3   -v /Volumes/DRIVENAME/network-analysis/results:/data/results \
4   -w /data \
5   graph-tool-geopandas \
6   bash -c "python3 /data/src/laplacian_graphtool.py /data/results/roads/N10-20_17_network.gpkg"

```

D.1.3 Graph-tool + GeoPandas 動作確認スクリプト

```

1 from graph_tool.all import Graph
2 import geopandas as gpd
3 print("graph_tool と geopandas の両方が import できました!")

```

D.2 KAGAYAKI: Singularity

本研究で使用した KAGAYAKI 計算ノードの主な実行環境仕様を以下に示す。

- OS: Ubuntu 20.04.2 LTS
- CPU: AMD EPYC 7H12 (64-core processor)
- コンテナ実行環境: Singularity 3.9.5

D.2.1 Singularity イメージ取得

```

1 source /etc/profile.d/modules.sh
2 module load singularity/3.9.5
3 singularity pull --name graph-tool_latest.sif docker://tiagopeixoto/graph-tool:latest

```

D.2.2 Overlay 作成と Python パッケージ追加

```
1 # kagayaki にログイン
2 ssh USERID@kagayaki
3
4 # singularity load
5 source /etc/profile.d/modules.sh
6 module load singularity/3.9.5
7
8 # graph-tool (latest) の コンテナから docker コンテナ singularity(sif) をビルド
9 singularity build graph-tool_latest.sif docker://tiagopeixoto/graph-tool:latest
10
11 # SIF 内容確認
12 singularity inspect --all graph-tool_latest.sif
13
14 # 作成 Overlay
15 singularity overlay create --size 2048 graph-overlay.ext3
16
17 # Graph-tool 確認
18 singularity exec --overlay graph-overlay.ext3 graph-tool_latest.sif python3 -c 'import graph_tool;
19     print(graph_tool.__version__)'
20
21 # 仮想環境の作成とパッケージインストール venvPython
22 singularity exec --overlay graph-overlay.ext3:rw \
23     --bind $PWD:/workspace graph-tool_latest.sif \
24     /bin/bash -c '
25     python3 -m venv --system-site-packages /workspace/venv &&
26     /workspace/venv/bin/pip install --no-cache-dir geopandas shapely fiona pyproj rtree rasterio
27 '
28
29 # 動作確認
30 singularity exec --overlay graph-overlay.ext3 \
31     --bind $PWD:/workspace graph-tool_latest.sif \
32     /workspace/venv/bin/python - <<'PY'
33 from graph_tool.all import Graph
34 import geopandas as gpd
35 print("graph_tool と geopandas の両方が import できました!")
36 PY
37
38 # 再作成+パッケージ再インストール venv (optional)
39 singularity exec --overlay graph-overlay.ext3:rw \
40     --bind $PWD:/workspace graph-tool_latest.sif \
41     /bin/bash -c '
42     rm -rf /workspace/venv &&
43     python3 -m venv --system-site-packages /workspace/venv &&
44     /workspace/venv/bin/pip install --no-cache-dir geopandas shapely fiona pyproj rtree rasterio
45 '
```

D.3 全体フロー図

本研究におけるデータ取得から分析プログラム実行までの全体的な処理フローを図 D.1 に示す。

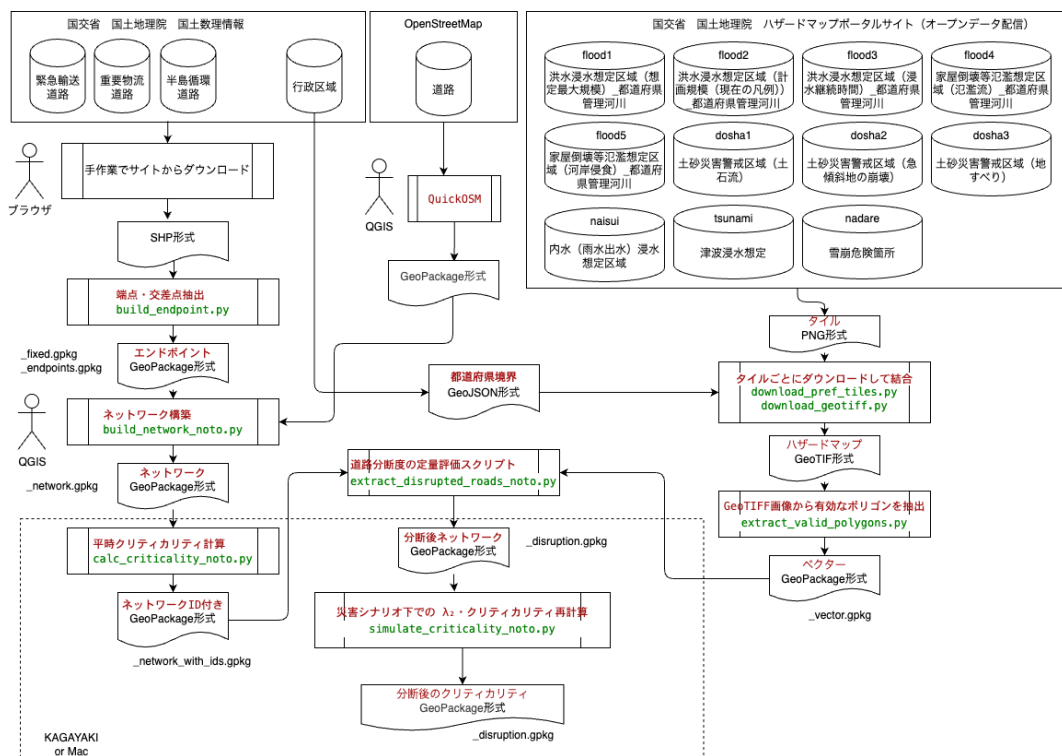


図 D.1: 全体フロー図