

相互依存構造を考慮した交通・電力ネットワーク脆弱性評価手法の構築

倉内 文孝¹・石樽 晃多²・應 江 黔³

¹正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

²学生会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

³非会員 岐阜大学教授 地域科学部地域政策学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail: ying@gifu-u.ac.jp

近年の気候変動等を受け、自然災害が多頻度化、激甚化している。特定地域に存在する社会基盤施設の被災は、人々に多大なる影響を及ぼす。また、災害に対するリスク評価においては、隣接するインフラ構造物の相互依存性を加味した管理の必要性が示されている。各種インフラは単体で特徴的な性質を有しているとともに、その間に依存・相互依存関係がみられる。本研究では、交通と電力ネットワークを対象として選定しその関係性の記述を試みる。特に、電力ネットワーク特性を考慮し、最適潮流問題として電力ネットワークの接続性を評価する。また2つのネットワークが相互に及ぼし合う影響について、それぞれをグラフモデルとして表現することに加え、接続脆弱性評価モデルを構築し災害発生を想定したシナリオ分析を行うことで、相互依存性を考慮した接続性と脆弱性の評価を行う。

Key Words : *vulnerability evaluation, road and power supply network, interdependency*

1. はじめに

気候変動等による災害の多頻度化や激甚化により、インフラの集中的な被災が顕著となってきた。このような状況を踏まえ、国土交通省は相互依存したインフラ構造物の総合的な管理の必要性を提言している¹⁾。一方、地方部の高齢化・過疎化は日常での交通依存の加速を招いており、近年のCASE技術の進展に伴う車の高機能化は、交通ネットワークの電力供給システム・情報通信システムとの相互依存性の増大に帰結する。これは災害時の交通システムの脆弱性増加へと繋がりをうる。本研究では、交通と電力のネットワークをグラフモデルで表現し、各インフラ間の関係性を記述する。加えてこれらが及ぼし合う影響について接続性評価モデルを構築し、災害発生を想定したシナリオ分析を行うことにより、相互依存するネットワークの脆弱性評価を試みる。

2. 接続性評価問題の考え方

接続判定とは、「あるノード間に有効な経路が存在するかどうか」を判定することとなるため、一般的には起終点ごとに判定を行う必要がある。一方で、今回対象と

したい問題は、「ある地点がそれ以外の地点と接続しているか」を判定することとなるため、特定の起点を対象とするのではなく、外部と接続できる任意の地点と接続していればよいことになる。そのため、「外部と接続している任意の地点」と接続している「仮想ノード」を設定し、その仮想ノードから地域内の外部接続ノードにコスト0の仮想リンクを設定した上で、接続判定ノードに対して接続性を評価すればよいことになる。

接続判定の直感的な方法として、最短経路探索を行い経路が見つからない場合、例えばダイクストラ法²⁾による最短経路探索を実施した場合に、ラベルが無限大(∞)となっている地点が非接続であると判断することだろう。このヒューリスティックな手法では、比較的大規模ネットワークでも適用可能な汎用的な手法であるものの、例えば接続性改善のためのネットワークデザインモデルを考える場合、数理問題として記述される必要がある。この問題に対して、先行研究³⁾では、接続判定が可能な数理計画問題として、賞金収集シュタイナー木問題 (Prize Collecting Steiner Tree Problem, PCSTP) を用いた方法論を構築した。PCSTPとは、各リンクに敷設コスト、各ノードに賞金が与えられているとき、各リンクの敷設の有無を制御変数とし、総敷設コストから総収集賞金を引いた値の最小化を図る混合整数線形計画問題として定式化さ

れる。シュタイナー木を得るための問題は、数多くの組み合わせを考慮する必要があり概して求解が難しい。そのため、先行研究では、直接シュタイナー木を求める代わりに最大流問題として定式化している。提案した方法は、元のシュタイナー木問題よりは格段計算可能性が高まっているものの、混合整数線形計画問題として定式化されており、大規模問題の求解には依然課題が残っている。また、電力および情報ネットワークも同様の定式化で表現しているが、実際には電力ネットワークにおいては大容量の蓄電池の普及が限定的であることもあり、柔軟に保管することが難しい。この点が、一度物資を運んでしまえば保管ができるため、容量を無視した純粋な接続性の評価で十分な交通ネットワークとの大きな違いとなっている。

以上より、本研究では、交通ネットワークについてはより簡便かつ計算可能性が高い接続性評価モデルを、電力ネットワークについてはその特性に応じたモデルの構築を試みることにする。

3. 接続性評価モデル

(1) 道路ネットワークの接続評価モデル

前述の通り、混合整数線形計画問題として定式化されるPCSTPでは大規模ネットワークにおける計算に課題が残るため、ここでは線形計画問題としての記述を前提に考えることにする。PCSTP問題では、各ノードが接続しているかどうかを0-1の二値変数で判定することから、この変数の値を確認すれば途絶の有無が容易に判定可能であった。この方法論の代わりに、本研究では、各需要地に対して要求される負荷量を唯一の仮想出発地から輸送することとし、その総輸送時間を最小化する問題として以下の通り定式化する。

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{a \in \mathbf{A} \cup \mathbf{A}_e} c_a x_a \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{a \in \text{In}(n)} x_a - \sum_{a \in \text{Out}(n)} x_a = \begin{cases} -N + 1 & \text{if } n = r \\ 1 & \forall n \in \mathbf{N} \setminus \{r\} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_a \geq 0, \forall a \in \mathbf{A} \cup \mathbf{A}_e \quad (3)$$

$$c_a = M, \forall a \in \mathbf{A}_e \quad (4)$$

ただし、

- c_a : リンク a の移動コスト (所要時間)
- x_a : リンク a の輸送量 (未知変数)
- N : ノード数 (= $|\mathbf{N}|$)
- $\text{In}(n)$: ノード n に流入するリンクの集合
- $\text{Out}(n)$: ノード n から流出するリンクの集合
- \mathbf{N} : ノード集合
- \mathbf{A} : リンク集合
- \mathbf{A}_e : 超過リンク (Excess link) の集合

- M : 実際のリンクの走行時間に対して十分大きな値
- r : 出発地

である。目的関数である式(1)は、総走行時間の最小化を意味する。式(2)は、各ノードにおける負荷量を1として、唯一の出発地 r からそれ以外のすべてのノードが繋がっていることを保証している。なお、リンクの途絶などによって連結されていないノードが存在する場合には式(2)を満たす x_a が存在せず、実行可能解がないことになる。このような状態を避け非連結の状態が生じないように、出発地 r から他のすべてのノードに超過リンク (Excess link) を設け、その所要時間を実際のリンクの走行時間より十分大きな数 M とする (式(4))。このようにすることで、物理的なリンクで連結されていない場合には超過リンクを使用することになり、解なしとなることを防ぐことができる。また、式(2)の制約条件に対応するラグランジェ関数はノードポテンシャル ψ と呼ばれており、超過リンクが利用される場合にはこの値が M と等しくなる。したがって、接続性はラグランジェ関数の値により判定可能である。交通ネットワークの評価では、災害が発生したとして、防災拠点にある備蓄品を需要地に送り届けることを想定し、その移動にかかる総走行時間を最小化することを目的関数としている。以上のように、道路ネットワークの接続性評価モデルは、未知変数をリンク輸送量 \mathbf{x} とする線形計画問題として記述できた。

(2) 直流 (DC) 潮流計算モデル

電力は、一時的な電気の保管が不可能である。したがって、交通ネットワークとは異なり、あるノードへ接続されているものの、需要過多により十分な電力を供給することができない場合も考えられる。そのため、本研究では電力ネットワークの接続性に加え、各需要地への電力供給量を同時に評価することとした。これらの評価には、潮流最適化の概念を活用する。潮流最適化とは、ネットワーク内の電力の流れを意味する潮流を合理的かつ効率的に流すことをいう。潮流は、ノード間の交流設定における位相差により制御可能であり、最適な位相差を線形計算で求められるようにしたものが潮流最適化問題である ⁵⁾。なかでも、ここでは抵抗値を無視した直流 (DC) 法潮流計算を用いることとした。なお、DC 潮流計算は、電圧が十分大きく抵抗値が無視できる条件下で成立するものであり、一般には 10000V 以上の電圧の送電網を対象とした計算である。

まず、以下を定義する。

- \dot{V} : 電圧ベクトル
- \dot{i} : 電流ベクトル
- V_m, I_m : 電圧及び電流の最大値
- v, i, p : 電圧, 電流, 電力の瞬時値

今、端子電圧が v の電池から電流 i が負荷に向かって流れているとき、負荷に供給される電力は次式で表される。この式を電力の基本式と呼ぶ。

$$p = vi \text{ [W]} \quad (5)$$

詳細は参考文献⁹⁾を参照いただきたいが、交流回路の場合、電圧、電流が正弦波となること、その際に電源電圧の周期 T を考慮し、位相角を θ とおくと、1周期の間に負荷に与えられる電力の平均値は、以下の通りとなる。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |\dot{V}||i| \cos \theta - |\dot{V}||i| \cos \theta \cos 2\omega t - |\dot{V}||i| \sin \theta \sin 2\omega t \, dt = |\dot{V}||i| \cos \theta \quad (6)$$

この式で与えられる電力を有効電力とよばれ、

$$|\dot{V}| = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$|i| = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

となる。この有効電力の式を用い、ふたつのノード n から m へ向かう電力 P_{nm} は、それぞれのノードの電圧の位相角をそれぞれ δ_n 、 δ_m とし、レジスタンス（抵抗値）が無視できるとすれば、以下のように記述できる。

$$P_{nm} = \frac{|V_n||V_m|\sin(\delta_n - \delta_m)}{X_{nm}} \quad (9)$$

ここで、 X_{nm} はリアクタンスと呼ばれ、交流回路における電圧と電流の比であり、直流回路における抵抗に類似したものである。さらに、位相差 $\delta_n - \delta_m$ が小さい場合、 $\sin(\delta_n - \delta_m) \cong \delta_n - \delta_m$ とかけるため、

$$P_{nm} = \frac{|V_n||V_m|(\delta_n - \delta_m)}{X_{nm}} \quad (10)$$

となる。この式は、直流回路におけるオームの法則と類似性を持ち、直流回路計算と同様の計算方法で系統内各部の位相、潮流を求めることができるため、直流（DC）潮流計算と呼ばれる。また、 $|V_n|$ 、 $|V_m|$ 、 X_{nm} は既知量であるため、ノード m から n へ移動する電力は、ノードごとに設定される位相角を求めれば一意に決まることになる。

(3) 電力ネットワークの接続性評価モデル

以上で示した DC 潮流計算モデルを用い、電力ネットワークの接続性評価モデルは以下の通り定式化できる。

$$\min_{\delta, P} \sum_{n \in N_c} P_n \quad (11)$$

subject to

$$\sum_{n=1}^N P_n = 0 \quad (12)$$

$$P_n = \sum_{m \in \text{Out}_n} |V|^2 Y_{nm} (\delta_n - \delta_m), \quad \forall n \in N \quad (13)$$

$$|V|^2 Y_{nm} (\delta_n - \delta_m) \leq c_{nm}, \quad \forall n, m \in N, n \neq m \quad (14)$$

$$\delta_1 = 0 \quad (15)$$

$$0 \leq P_n \leq \bar{P}_n \quad \forall n \in N_p \quad (16)$$

$$\bar{P}_n \leq P_n \leq 0 \quad \forall n \in N_c \quad (17)$$

$$P_n, \delta_n \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in N \quad (18)$$

ただし、

P_n : ノード n の電力量（負の場合は負荷量）

\bar{P}_n : ノード n の最大発電量（負荷量）

N : ノード集合

N_p : 発電ノード集合

N_c : 需要ノード集合

V : 電力ネットワーク内の電圧

Y_{nm} : リンク nm のアドミタンス

δ_n : ノード n の位相角

c_{nm} : リンク nm の容量

である。

この定式化では、全てのノードにおける電圧は同一とし、 V で表現している。目的関数である式(11)は、需要地における電力負荷量最大化（電力供給量最大化）を意味する。式(12)は、総発電量と負荷量が一致していることを意味する。式(13)は、各ノードの位相角から求められるノード間の電力量の保存則を表し、式(14)はリンクの電力容量制約である。なお、アドミタンスは、レジスタンスが無視できるとすると、リアクタンスの逆数として求められる。式(15)は、各ノードの位相を決定するために必要となる、基準の位相を定めている。式(16)および(17)は、各ノードの電力量について、発電量（+）および負荷量（-）が上限以下であることを示す。最後に、式(18)は、電力量および位相角の実数条件である。この問題は、位相角 δ および各ノードにおける発電量あるいは負荷量である P に関する線形式であり、問題は線形計画問題として記述されている。

(4) 相互依存性の評価

複数のインフラネットワークにおける相互依存性は、ノード、あるいはリンクの利用可能性を示す形で表現する。すなわち、ある被災シナリオにおいて、交通リンク i と電力リンク j が相互依存する場合、片方が破壊されればもう一方も破壊されることを仮定する。この場合には、

$$v_i = 0 \quad (19)$$

$$P_{nm} = 0 \quad (20)$$

とおけばよい。ただし、電力リンク j は、ノード (n, m) 間を接続するものとする。同様に、ノードの破壊についても当該ノードをネットワークより削除すればよいため、物理的な破壊による相互依存性は容易に表現可能である。

4. 脆弱性評価の方法

ネットワークの脆弱性を測る一般的な方法として、ランダム順にノードあるいはリンクを破壊し、その際に接続状態が確保されているノードを数え、全ノードに対しての割合（接続ノード率）を算出する。なお、仮起点

ノードなど、当該ノードの破壊によりネットワーク全体の接続性が完全に失われるようなノードは破壊対象外とする。この操作を異なるランダムシードで複数回繰り返すことにより乱数の影響を排除した上で、破壊ノード（リンク）数に対する平均接続ノード率や、接続ノード率の分散等により評価を行う。さらに、様々な計算ケースにおいて、特定のノード（リンク）が破壊された場合に接続ノード率が大きく低下する場合、そのノード（リンク）はネットワークの接続性に大きな影響を及ぼすと考えられることから、これをクリティカルノード（リンク）と称することとする。

交通リンクが被災する場合、そのリンクの所要時間を十分大きな数である M に設定することで対応可能である。そのように設定した上で、式(1)~(4)を解き、 λ_i が M と等しいノードの大小により接続性を評価できる。ノード破壊のケースにおいては、当該ノードに接続するリンク全てについて同様に設定することで表現できる。

電力ネットワークについては、リンクの破壊が生じた場合には破壊リンクに該当するアドミタンス Y_{nm} をゼロに設定することでその間を流れる電力がゼロとなる。ノードの破壊については、交通と同様に当該ノードに接続するリンク全てについて同様に設定すればよい。

5. 下呂市ネットワークにおける実証評価

本章では、それぞれのモデルを用いて岐阜県下呂市における相互依存構造を考慮した脆弱性評価を行うため、下呂市の道路ネットワークおよび送電網・配電網ネットワークを作成し挙動確認を行う。また、リンク（ノード）破壊による脆弱性評価をそれぞれのネットワーク単独で実施し、クリティカルリンク（ノード）を特定する。

(1) 交通ネットワークの設定

交通ネットワークのデータは Open Street Map を用いて作成した。QGIS を用い、ノード数 2,726、有向リンク数 7,082 の下呂市の道路ネットワークを図化したものを図-1 に示す。図中の青線が国道、赤線が県道、橙線がその他の道路である。国道 41 号が下呂市を南北に貫き、市内および市外への移動に非常に重要な路線である。また、南西部には国道 256 号（濃飛横断自動車道）、北西部と南東部には国道 257 号が通っており、いずれも国道 41 号から分岐している。さらに、市内各地に県道が通っており、北部から中央部にかけて国道 41 号に並行する県道もみられる。ここで、ネットワークの冗長性について考えるために、平均次数を算定してみた。次数とは、あるノードに流入もしくはそこから流出しているリンクの数を表し、その値をネットワーク全体で平均したものを平均次数という。したがって、平均次数はリンク数の 2 倍

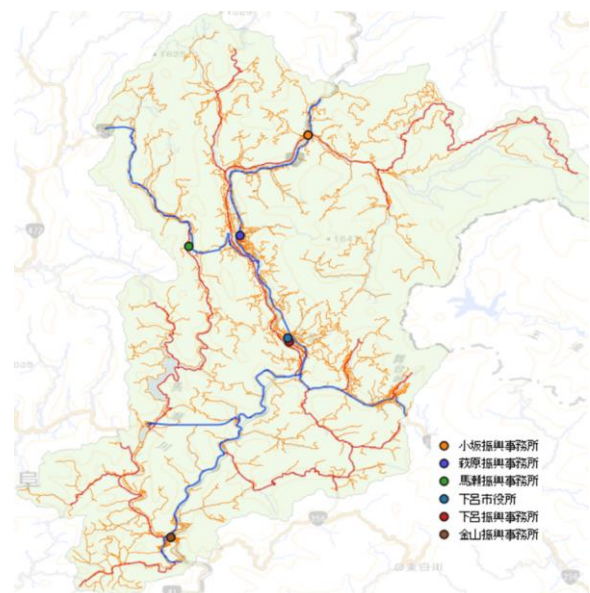


図-1 下呂市交通ネットワーク

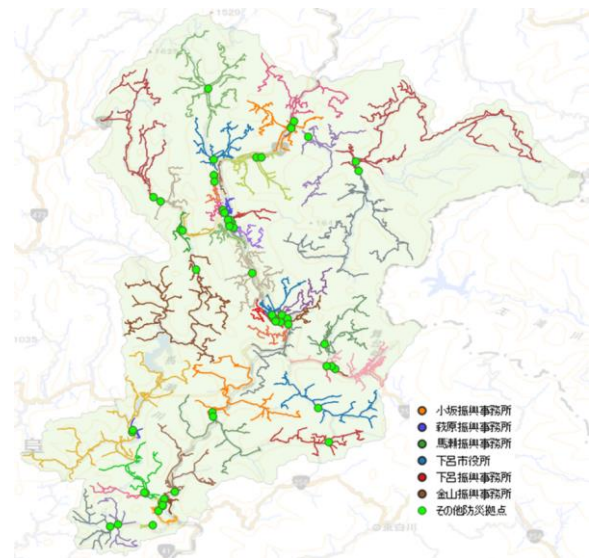


図-2 障害がない場合の接続性計算結果

をノード数で除した値となり、平均次数が 2 以下の場合、行き止まりが多い冗長性の低いネットワークであるといえ、逆に全てのノードが 4 枝交差点であれば 8 をとる。計算の結果、交通ネットワークの平均次数は 5.2 となり、比較的冗長性の低くないネットワークといえる。

交通ネットワークにおける供給源として防災拠点を考えた。防災拠点は、下呂市役所、下呂市の振興事務所（5 か所）と指定避難所（53 か所）とする。選定した施設が実際に存在する位置との距離が最小のノードを防災拠点ノードに選定し、その他のノードはデマンドポイントとした。防災拠点の位置は図-2 に示している。

作成した下呂市の道路ネットワークにおいて、すべてのリンクやノードに障害が発生していない条件下での接続状態の計算を実施した。各ノードの負荷量は一律 1 とする。各リンクの移動コストは、リンク長を各リンクに相当する実際の道路の最高速度に 0.7 を掛けた値で除し

た値とする。計算結果を図-2 に示す。リンクの色は、どの防災拠点に接続されているかを表す。どちらのケースにおいても、すべてのノードに接続され、問題なく計算を実施することができた。また、このモデルでは、最短で到達できる防災拠点から枝が伸びることになるため、最短経路で接続できる防災拠点がどこかを計算結果より求めることが可能である。

(2) 電力ネットワークの設定

まず、送電網に含まれるノードとして、発電所を想定する。発電所や送電線の位置に関しては、中部電力パワーグリッド株式会社により公表されている、特別高圧以上の送変電設備に関する熱容量面での空容量を示す系統空容量マッピング⁶⁾や、地理院地図⁷⁾および Google マップの航空写真レイヤ⁸⁾を参照する。ノード数 12、無向リンク数 11 のネットワークであり、ネットワーク内に発電所は 10 か所存在する。なお、この送電網には、下呂市外ではあるものの下呂市近隣に位置する発電所（久々野、七宗、新七宗）も含まれている。次に、配電網に含まれるノードとして、配電用変電所とデマンドポイントを想定する。配電用変電所や配電線の位置に関しては、中部電力株式会社のホームページ⁹⁾や、Google マップのストリートビューおよび航空写真レイヤを参照する。ノード数 2,561、無向リンク数 2,691 のネットワークであり、ネットワーク内に配電用変電所が 6 か所存在する。送電網、配電網のネットワークを図-3 に示す。水色が送電網、青が配電網である。

作成した下呂市の送配電ネットワークにおいて、すべてのノードに障害が発生していない条件下での接続状態の計算を実施する。各発電ノードの最大発電量は表-1 のとおりである。最大発電量は、中部電力株式会社ホームページ⁹⁾に記載されている各発電所の出力の 30% の値とした。また、電圧は送電網、配電網ともに 6.6kV で統一した。さらに、送電線のリンク容量は系統空容量マッピング⁶⁾を参考に決定し、リアクタンス X および配電線のリンク容量 c に関しては、表-2 に記した値を用いて、

$$X = X_0 L$$

$$c = 6.6I$$

と決定した。なお、表-2 は、すべての送電線を鋼心アルミより線（ACSR）120mm²、配電線を硬銅より線（HDCC）60mm² と仮定しそれに即した値を記している。計算結果を図-4 に示す。リンクの太さと電力供給量は比例している。すべてのノードに接続し、各リンクの電力量および各発電ノードの発電量を求められ、問題なく計算を実施することができた。新七宗発電所と瀬戸発電所をつなぐ南部の送電線に大量の電力が送られている。また、配電用変電所周辺や幹線道路沿いに多くの電力が供給され、一般的な考えと合致する。



図-3 下呂市電力ネットワーク

表-1 発電ノードの最大発電量

発電所名	最大発電量[kW]	発電所名	最大発電量[kW]
久々野発電所 (高山市)	11,670	馬瀬川第二発電所	19,920
小坂発電所	15,030	下原発電所	6,660
中呂発電所	4,080	大船渡発電所	1,920
東上田発電所	11,310	七宗発電所 (白川町)	1,860
瀬戸発電所	14,760	新七宗発電所 (白川町)	6,000

表-2 許容電流とリアクタンス

	リアクタンス X_0 [Ω/km]	許容電流 [A]
送電線	0.233	282
配電線	0.409	



図-4 障害なしでの電力供給状態

(3) 交通ネットワーク単独の脆弱性評価

異なるランダムシードを用いて交通リンクをランダム順に破壊する計算を 10 回繰り返した。破壊の対象となるリンクは、仮想リンクや超過リンクを除いたすべてのリンクである。この評価では、各ノード周辺に位置する人口を元にノードの重みを設定し、全人口に対する交通がカバーしている割合を示す交通カバー率を評価指標とする。縦軸を交通カバー率、横軸を全リンク数に対する破壊されたリンク数の割合であるリンク破壊率とし、ランダムリンク破壊に伴う交通カバー率の変化を図-5 に示す。また、平均交通カバー率を比較したグラフを図-6 に、交通カバー率の変化に関して各計算結果の分散を比較したグラフを図-7 に示す。なお、図-6、図-7 には比較のため、6 カ所の市庁舎のみを防災拠点とした場合の計算結果についても併せて示している。図より、リンク破壊率 10%あたりからおおよそ直線に近い形で交通カバー率が低下し、リンク破壊率 35%を過ぎたあたりですでに全人口の半分のカバーとなっているが、市庁舎のみを防災拠点とした場合には平均カバー率の低下がより顕著である。また、分散をみると、指定避難所がある場合には比較的安定しているが、市庁舎のみとした場合にはリンク破壊率 20%から 30%付近で顕著に大きくなる。交通カバー率の変動は、破壊されるリンクの順番に大きな影響を受けやすいことがわかる。

次に、クリティカルリンクについて考察する。ランダムリンク破壊を 50 回繰り返し、各リンクが被災した場合の交通カバー率の低下率の平均が上位のリンクをクリティカルリンクとした。その結果を図-8 に示す。特徴として、(1)萩原と下呂に集まっていること、(2)防災拠点の比較的近くに存在していること、(3)橋や幹線道路に多いこと、の3つがあげられる。特徴(1)に関しては、萩原と下呂は人口が多く、他地域より交通カバー低下率が高くなる可能性が高いため、クリティカルリンクが集中するためと考えられる。逆に、馬瀬ではどちらのケースにおいても抽出されなかった。特徴(2)に関しては、防災拠点から 1km以内に位置するクリティカルリンクが 20 本中 17 本とほとんどが該当していた。特徴(3)に関しては、一般的に橋の数は限られているため、河川の対岸に移動したいときには一つの橋に人や車が集まる。したがって、その橋が途絶する場合、多くの人に影響が及び、交通カバー低下率の顕著な低下につながると考えられる。図-9 の下呂市中心部における様子を見ると、3 本の道路橋を確認できるが、そのうち 2 本がクリティカルリンクである。加えて、国道や県道上のリンクも多く抽出されたが、国道 41 号上で抽出されたリンクは 1 本のみで、それに並行する県道や旧国道に多い傾向にある。これは、県道や旧国道の方が人口の多い住宅密集地を通ることが多いためと考えられる。

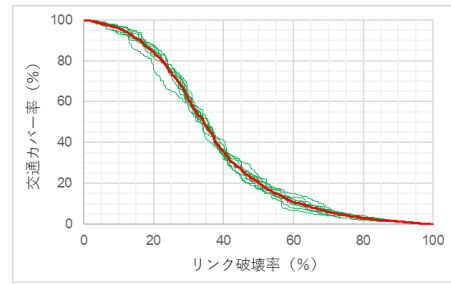


図-5 交通カバー率の変化

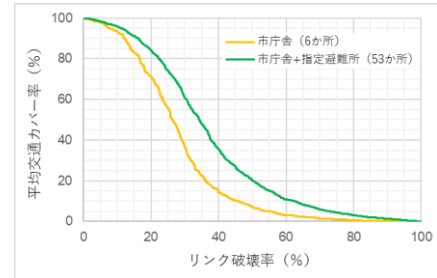


図-6 平均交通カバー率の推移

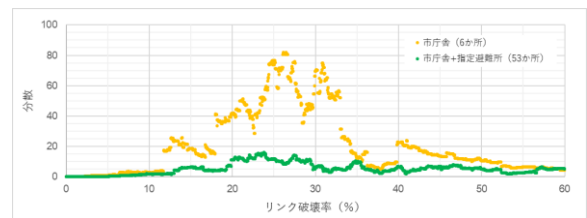


図-7 交通カバー率の分散

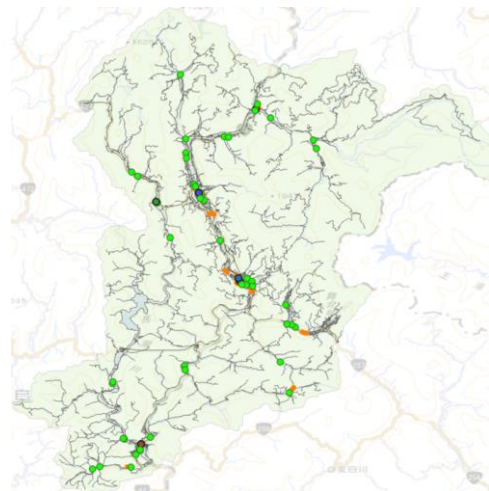


図-8 クリティカルリンクの位置 (交通)

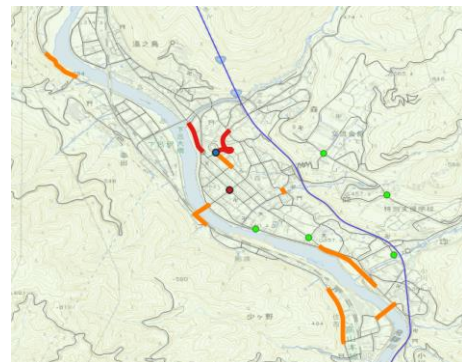


図-9 下呂市中心部のクリティカルリンク (交通)

(4) 電力ネットワーク単独の脆弱性評価

異なるランダムシードを用いて電力リンクをランダム順に破壊する計算を 10 回繰り返す。破壊の対象となるリンクはすべての配電線であり、送電線は破壊されないものとする。この評価では、交通と同様に人口を需要地に割り付けた結果生成したノードの重みにより算定した電力カバー率を指標とする。縦軸を電力カバー率、横軸をリンク破壊率とし、ランダムリンク破壊に伴う電力カバー率と 10 回の平均電力カバー率（図中の赤線）の変化を図-10 に示す。また、電力カバー率の変化に関して計算結果の分散のグラフを図-11 に示す。なお、各試行回においてリンク破壊率 35% まで実施することとする。リンク破壊率の増加とともに、おおそ直線に近い形で電力カバー率が低下し、リンク破壊率 20% の段階で電力カバー率も 20% 程度と。急激に接続性が失われることがわかる。また、分散をみると、リンク破壊率が 5% に達する前に大きな値を示しており、この傾向が 20% ほどまで継続している。特に 15% から 20% 付近で顕著であり、最大値 116 もここで出現する。すなわち、電力カバー率の変動は、交通ネットワークと比べて破壊されるリンクの順番に影響をより受けやすく、電力カバー率にかなりの差異が生じている。

さらに 40 回計算を行い、合計 50 回の計算結果をもとに電力ネットワークのクリティカルリンクを特定する。平均電力カバー低下率の高かった上位 20 本のリンクを図-11 に示す。図中の橙線がクリティカルリンクである。電力のクリティカルリンクの特徴として、(1) 萩原と下呂に集まっていること、(2) 電力需要の多い地域と地域の間位置すること、の 2 つがあげられる。特徴(2)に関しては、図-12 をみるとわかりやすい。一般的に、市街地では電線が網目状に張られていることが多いが、市街地から離れると並行する電線の本数が少なくなる。すなわち、需要の多い地域から離れるほどネットワークの冗長性が低く、クリティカルリンクになりやすいといえる。また、交通ネットワークでは抽出されなかった馬瀬のリンクが電力ネットワークでは抽出された（図-13）。馬瀬と他地域とを結ぶ配電線は、隣の萩原と金山へそれぞれ 1 本ずつと限られており、この点は交通と同様である。しかし、電力では供給源となる発電所や配電用変電所が馬瀬には存在しないため、馬瀬に電力供給するには必ず 2 本のうちのいずれかを使用する必要がある。そのためクリティカルリンクになりやすいと考えられる。

(5) 相互依存構造を考慮した脆弱性評価

最後に、相互依存構造を考慮した脆弱性評価を行った結果を考察する。相互依存構造はそれぞれのネットワークのリンクを共有することで表現する。隣接するインフラ構造物の相互依存性を表現するため、マルチレイヤネ

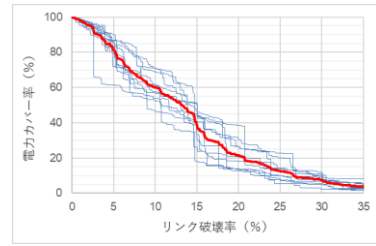


図-10 リンク破壊に伴う電力カバー率の変化

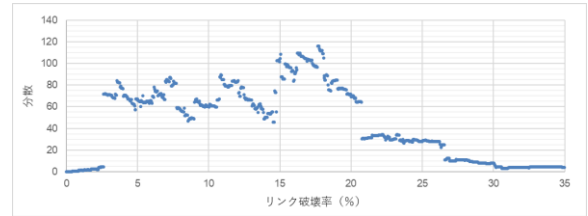


図-10 電力カバー率の分散



図-11 クリティカルリンクの位置 (電力)

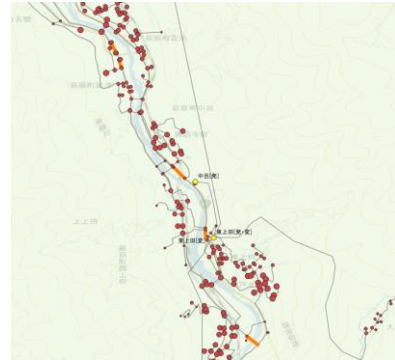


図-12 東上田発電所周辺の様子



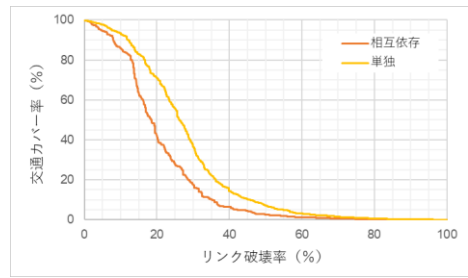
図-13 馬瀬と萩原を結ぶ配電線の様子

ネットワーク内において交通リンクと電力リンクが並行している箇所を共有させた。この操作により、交通リンクでは3,553本のうち1,808本(約51%)、電力リンクでは配電線2,691本のうち1,580本(約59%)が抽出された。

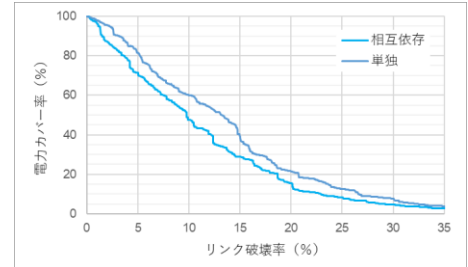
ネットワーク単独での評価のときと同様に、異なるランダムシードを用いて交通および電力リンクをランダム順に破壊する計算を5回繰り返すことで相互依存ネットワークにおけるリンクの特性を把握する。なお、この評価では交通ネットワークにおいて市庁舎(6か所)のケースを対象とする。破壊の対象となるリンクは、交通ネットワークでは仮想リンクや超過リンクを除いたすべてのリンク、電力ネットワークでは配電線のみであり送電線は破壊されないものとする。ここで、防災拠点に電力が供給されなくなった場合にはその防災拠点は機能しないと仮定する。リンク破壊に伴う交通カバー率および電力カバー率の平均値と分散の結果を、ネットワーク単独での評価結果と比較して図-14、15に示す。

基本的に相互依存ネットワークにおける評価では一度に破壊するリンクが多いため、各カバー率の低下速度はネットワーク単独のときよりも速い。この傾向は交通ネットワークの方が顕著にみられ、リンク破壊率約20%の時点で、相互依存評価と単独評価との間に30%ほどの乖離が生じた。また、分散をみると、交通ネットワークでは単独評価の最大値が82であるのに対し、相互依存評価では129をとる。相互依存評価の方が大きい値を示す傾向があり、特にリンク破壊率15%付近より大きな値が多く観測、すなわち交通ネットワークは15%程度のリンク破壊からネットワークパフォーマンスに大きな不確実性が生じているといえる。一方、電力ネットワークでは単独評価の最大値が116であるのに対し、相互依存評価では106をとる。相互依存と単独評価との間で大きな差はみられないが、単独評価ではリンク破壊率が15%を過ぎたあたりで最大値をとるのに対し、相互依存評価では2%ほどと最大値の出現が非常に早く、その後は徐々に低下する。相互依存ネットワークにおいて電力カバー率はリンク破壊の早期の段階から急激に落ち込み、その後はある一定の値に収束した。

次に、平均交通カバー低下率および平均電力カバー率の高かった上位20本のリンク図-16に示す。図中の橙線が交通、青線が電力のクリティカルリンクである。交通カバー低下率から特定したクリティカルリンクをみると、交通リンクは萩原や下呂の防災拠点付近に集中している一方、電力リンクは南東部を主として各地に分布している。また、電力カバー低下率から特定したクリティカルリンクをみると、交通リンクは萩原や下呂に集まっているもののやや分散しているようにみられ、電力リンクは各地に分布しているものの、発電所や配電用変電所付近で抽出されたリンクもみられる。さらに、2つの結果に

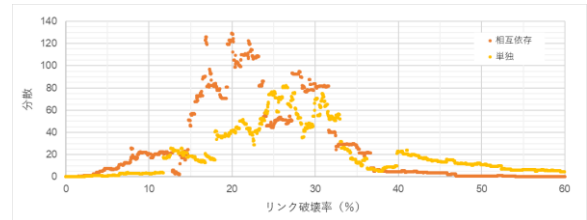


(a) 平均交通カバー率

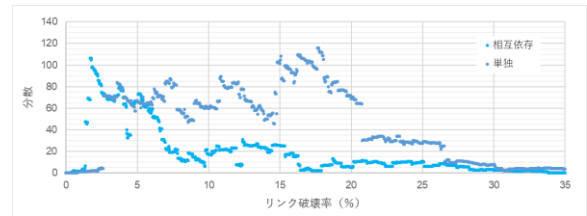


(b) 平均電力カバー率

図-14 リンク破壊に伴う平均カバー率の推移



(a) 交通カバー率



(b) 電力カバー率

図-15 リンク破壊に伴うカバー率の分散の推移

において、単独評価のときと同一もしくは同様の場所に位置するリンクも抽出された。図-17は下呂南東部で抽出された交通リンクを示しているが、交通ネットワークの単独評価においても当該リンクが抽出された。このリンクは乗政などの集落と防災拠点のある下呂中心部をつなぐ数少ないリンクであり、相互依存ネットワークにおいても重要なリンクとして抽出された。一方で、単独評価では抽出されることのなかったリンクが相互依存評価では抽出されることもあった。図-18がその一例である。このリンクは需要の多い市街地から離れており、最寄りの瀬戸発電所からも距離があるが、周辺の夏焼や門和佐につながる数少ないリンクであるため抽出されたと考えられる。同様に、単独評価では抽出されず相互依存評価において初めて抽出されたリンクには、需要や人口の多くない市街地から離れた地域かつ冗長性の低いネットワ

ークとなっている地域に存在するといった特徴がみられた。このようなリンクはいわば潜在的なクリティカルリンクであり、相互依存評価でのみ抽出することが可能であったため、相互依存構造を考慮する接続脆弱性評価に対する価値をみいだすことができた。

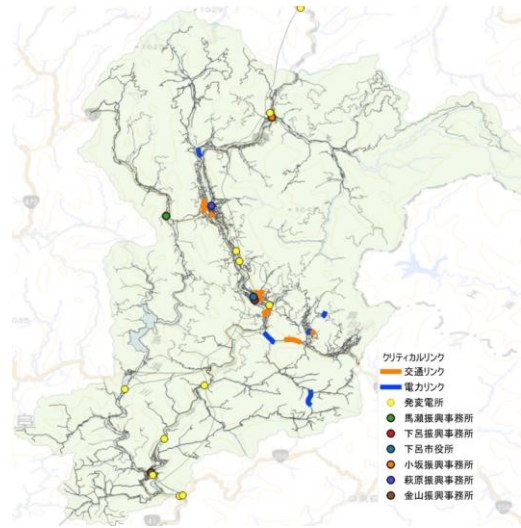
5. おわりに

本研究では、重要インフラのうち交通システムと電力システムが構成するネットワークをグラフモデルとして表現し、各インフラ間の関係性を記述した。また、接続脆弱性評価モデルを構築し、相互依存性を考慮した評価を行った。その成果を以下に列挙する。

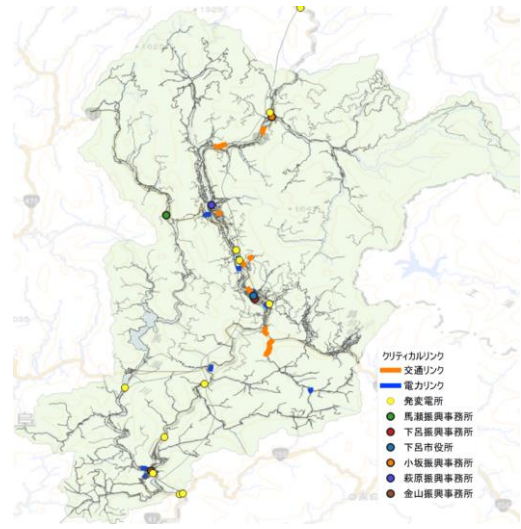
- 電力ネットワークでは、系統内の電力の流れを合理的かつ効率的なものにする潮流最適化の概念を用いることで、接続性に加えて各需要地への電力供給量も評価することを可能にした。また、リンクに容量制約を設けることでより現実的な潮流を算出した。簡単な仮想ネットワークにモデルを適用し、提案したモデルにより想定通りの計算結果が得られることを確認した。
- 下呂市の道路網と送配電網をもとに細部まで再現したネットワークを用いた計算を実施した結果、提案した交通接続判定モデルならびに電力供給判定モデルにより実規模の大きなネットワークにおいても定量的な評価が可能であることを確認した。加えて、ランダムリンク破壊を実施し、周辺施設や人口等と比較しながらネットワーク上の脆弱地点を把握する方法を提案し、実ネットワークでも十分計算可能であることを示した。
- 交通と電力ネットワーク間の相互依存構造をリンクが同時に機能していることを制約条件として表現することで、相互依存構造を考慮した脆弱性評価が問題なく実施可能であることを示した。また、各々のネットワーク単独での評価で得られた知見と比較することで、より具体的な脆弱性評価が可能であることを示し、相互依存評価の価値をみいだした。

また、今後の課題としては以下があげられる。

- 簡単のため、電力供給判定モデルは、直流（DC）法潮流計算により最適な位相差を線形計算で求めたが、この計算は抵抗を無視しており、電圧の低い系統では計算結果の誤差が大きくなる傾向にある。そのため、一般的には電圧が十分高く抵抗の影響が無視可能な送電ネットワークに適用するものである。6.6kV の電圧で配電される配電網は、電力ネットワーク内では電圧の低い系統に分類されるため、正確な計算結果の算出には、抵抗も考慮した非線形モデルを用いることが適切である。



(a) 平均交通カバー率低下からの特定



(b) 平均電力カバー率低下からの特定

図-16 相互依存性を考慮したクリティカルリンクの特定

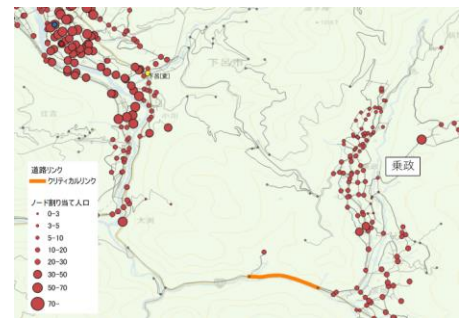


図-17 下呂市南東部におけるクリティカルリンク

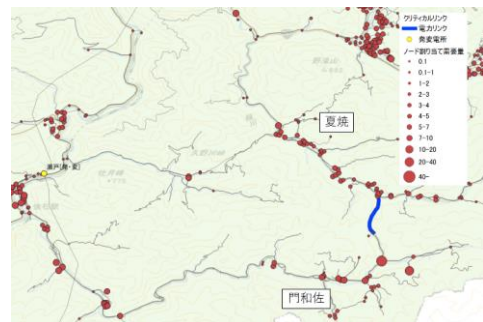


図-18 夏焼、門和佐周辺の様子

- ・本研究では、交通ネットワークの対象として道路交通のみを選定し評価を行った。しかし、現実では道路のみならず、鉄道、路線バス、デマンドバス等様々な公共交通も存在し、それらが重なり合って交通ネットワークが形成されているため、これらも含めたマルチレイヤネットワークにより接続性の評価をすることが望ましい。
- ・本研究では、重要インフラのうち交通ネットワークと電力ネットワークの2つのインフラを対象として計算を行ったが、同じく重要インフラの1つである情報通信ネットワークも含めた3インフラネットワークでの評価を行うことも必要である。
- ・本研究では接続脆弱性の評価を中心に行ってきたが、提案した手法は現状のネットワークの特性を明らかにしたにすぎない。そのため、相互依存性を有するインフラネットワークの脆弱性を改善するための方向性を提案可能なネットワークデザイン手法 (NDP) の構築を行うことが重要と考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H01557 の助成を受け遂行された。また、計算の遂行において、岐阜大学宮城俊彦特任教授、北海道大学杉浦聡志准教授、熊本大学安藤宏恵助教から様々なアドバイスをいただいた。また、中部電力パワーグリッド株式会社より提供していただいた岐阜県下呂市における配電網のデータを利用した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省, “近年の主な災害で得られた教訓と課題” (<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/sdt/pdf01/04.pdf>)
- 2) 藤田素弘, “8.1 最短経路探索アルゴリズムとデータ構造”, 土木学会編, 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, pp. 133-140, 丸善, 1998.
- 3) 倉内文孝, 石樽晃多, 松下祥大, “相互依存性を考慮した交通・電力・情報通信ネットワークの脆弱性評価手法の構築”, 土木計画学研究・講演集, 66, CD-ROM, 2022.
- 4) Ahuja, R.K., Magnanti, T.L. and Orlin, J. B.: '9.3 Optimality conditions', In *Network Flows*, 306-310, Prentice Hall, 1993.
- 5) 山城迪, “直流法による電力潮流最適化”, 電気学会論文誌, 97 卷 11 号, pp. 679-684, 1977.
- 6) 系統空容量マッピング, 中部電力パワーグリッド株式会社, URL : https://powergrid.chuden.co.jp/goannai/hatsuden_kouri/takuso_kyokyu/rule/map/ (2023/01/30 アクセス)
- 7) 地理院地図, 国土交通省国土地理院, URL : <https://maps.gsi.go.jp/> (2023/01/30 アクセス)
- 8) Google マップ, URL : <https://www.google.co.jp/maps/> (2023/01/30 アクセス)
- 9) 中部電力の水力発電所一覧, 中部電力 HP, URL : https://www.chuden.co.jp/energy/renew/ren_setsubi/water/wat_chuden/wat_list/ (2023/01/30 アクセス)

VULNERABILITY EVALUATION MODEL FOR TRANSPORT AND POWER SUPPLY NETWORK CONSIDERING INTERDEPENDENT STRUCTURE

Fumitaka KURAUCHI, Kota ISHIGURE and Qian Jiang YING

Natural disasters have become more frequent and severe in recent years due to climate change and other factors. Damage to infrastructural facilities in a particular area has a significant impact on people. The need for management that takes into account the interdependence of adjacent infrastructures has been pointed out in risk assessment for disasters. Various infrastructures have characteristic properties on their own, as well as dependencies and interdependencies between them. In this study, transport and power supply networks are selected as targets and an attempt is made to describe the relationships between them. In particular, the connectivity of the power network is evaluated as an optimal flow problem, taking into account the characteristics of the power supply network. In addition to expressing the influence of the two networks on each other as a graphical model, a connectivity and vulnerability assessment model is constructed and a scenario analysis is carried out assuming the occurrence of a disaster to assess connectivity and vulnerability in consideration of interdependence.