

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

倉内文孝¹・石博晃多²・松下祥大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

¹非会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail: y3030003@edu.gifu-u.ac.jp

¹正会員 元岐阜大学 工学部社会基盤工学科

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、電力、情報通信システムを対象として選定しその関係性の記述を試みる。また3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。仮想ネットワークにおいて挙動確認を行うとともに、岐阜県下呂市のネットワークを対象に脆弱性評価ならびにクリティカルノードの抽出を行った。

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うる。本研究では、交通・電力・情報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。

内閣府は、第5期科学技術基本計画において、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより開かれる未来社会「Society 5.0」²⁾を提唱した。大容量かつ低遅延な5G通信は、自動運転におけるV2Xに必要な不可欠である。他方、EVに搭載されるバッテリーは

非常時の電源供給施設の代替としても活用例がある。このように、社会に先端技術が普及するとともに分野横断的な連携が要求されることが容易に想像できる。本研究では、このような将来的な依存関係も想定している。

2. 接続性評価問題の考え方

(1) 接続判定の基本的な考え方

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³⁾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。そのため、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)⁴⁾を用いることとした。

(2) 賞金収集シュタイナー木問題 (PCSTP)

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。ここでは、直接シュタイナー木を求める代わりに以下の最大流問題PIを解くことにした。道路ネットワークにおいて、目的関数と制約式は次のように表される。

【P1】

$$\min_{x,y,f} \sum_{a \in A} c_a x_a - \sum_{n \in N_d} p_n y_n \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{a \in In(n)} x_a = y_n, \quad \forall n \in N \setminus r \quad (2)$$

$$y_r = 1 \quad (3)$$

$$f_a \leq |N_d| x_a, \quad \forall a \in A \quad (4)$$

$$\sum_{a \in Out(r)} f_a = \sum_{n \in N_d} y_n \quad (5)$$

$$x_a \in \{0,1\} \quad \forall a \in A \quad (6)$$

$$f_a \geq 0 \quad \forall a \in A \quad (7)$$

$$y_n \in \{0,1\} \quad \forall n \in N \quad (8)$$

ただし、

x_a : リンク a が PCST に含まれていれば 1 をとる二値変数

y_n : ノード n が PCST で接続されていれば 1 をとる二値変数

f_a : リンク a の交通量

c_a : リンク a の敷設コスト

N : ノードの集合

r : 仮想起点ノード

A : リンクの集合

N_d : 接続判定すべきノードの集合

である。目的関数第 1 項は、シュタイナー木に含まれるリンク ($x_a = 1$) のコストを示しており、第 2 項は賞金が収集されるノード ($y_n = 1$) における収集賞金の総和を示しており、これを最小化する。制約条件について順に説明する。まず、式(2)は、あるノードに着目しているとき、そのノードに流入するリンク集合の x_a の和

が当該ノードの y_n と等しいことを示しており、もしその和が 0 であればノード n は接続されず、1 であれば接続される。式(3)は起点ノードがシュタイナー木に含まれることを表す。なお、一般的な PCSTP では、サブツアー (出発地と接続しないループ) の形成を回避するために、すべての起こりうるノードのサブセット集合に対する制約条件を課しているが、ここでの定式化はその代わりに補助フロー f_a を用いる。これは、接続されるノードの数に応じたフローを考え、それが $x_a = 1$ のリンク上を始点からそれぞれのノードに向かって 1 単位ずつ流れることを考えている。このフローに関連して、式(4)はフローが $x_a = 1$ のリンクにしか流れないことを表している。式(5)が重要な制約式で、シュタイナー木に含まれるノードの分のフローが起点ノードから出発しなければならないことを表している。サブツアーが生じる場合、サブツアー内のノードには起点ノードから到達できないため、この制約条件が満たされない。また、式(6)は流れの保存条件であり、 $y_n = 1$ のノードにおいてはフローが 1 単位小さくなる。以上のように、PCSTP は混合整数線形計画問題として記述できる。

(3) 相互依存性の評価方法

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、あるいはリンクの接続の有無を表す二値変数 x_a, y_n に相互依存性を加味すれば表現できる。ここでは、前節で定義した各変数について、上添字 Tr を付与すれば交通、 Ps を付与すれば電力ネットワーク、 In を付与すれば情報ネットワークを表現するものとする。例えば、ある電力ネットワーク上のリンクが道路上に設置されており、道路が被災すれば電力リンクも被災してしまう場合、交通ネットワーク $G(N^{Tr}, A^{Tr})$ 上におけるリンク a に関する x_a^{Tr} と対応する電力ネットワーク $G(N^{Ps}, A^{Ps})$ 上における地理的に対応するリンク b に関する x_b^{Ps} との間に以下の関係があると仮定すればよいことになる。

$$x_b^{Ps} \leq x_a^{Tr} \quad (11)$$

この条件では、交通ネットワーク上のリンクが破壊される ($x_a^{Tr} = 0$) と、電力ネットワーク上のリンクも破壊される ($x_b^{Ps} = 0$) が、逆は成立しておらず、片方向の依存性を表している。双方向性を表す場合には、両者に等号が成立することとすればよい。

(4) 脆弱性評価手法

接続脆弱性の評価手法として、ランダム順にノード (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、仮想起点ノードなど、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。

3. 簡易仮想ネットワークにおける挙動確認

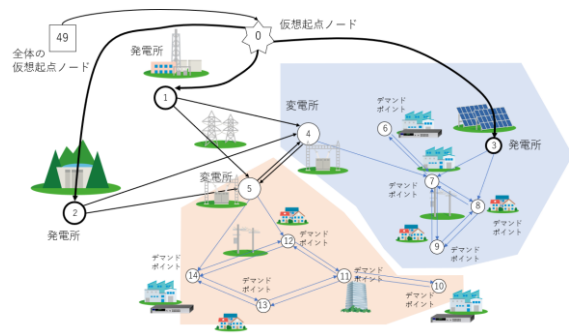
(1) ネットワークの設定

図-1 に示す簡易的な 3 インフラネットワークを想定し、相互依存性が接続状態に与える影響を考察する。電力ネットワークにおいては、発電所および変電所を設け、そこから需要地（デマンドポイント）へ電気を送るものとした。情報ネットワークについては、サーバーおよびルーターを介してデマンドポイントに接続する。さらに、交通ネットワークについてはノードを交差点あるいは地域とし、それらを道路区間で接続する。また、各ノードと防災拠点または外部ノードとの接続を確保するものとする。本来は、防災拠点が外部ノードと接続していることが求められるが、今回は防災拠点に備蓄があるものとして扱い、防災拠点との接続性が確保されていればよいものとした。3つのネットワーク全体で、ノード数 50、有向リンク数 110 となる。また、3つのネットワークの相互依存について、表-1 のように設定した。この相互依存の有無に関して分析を進める。

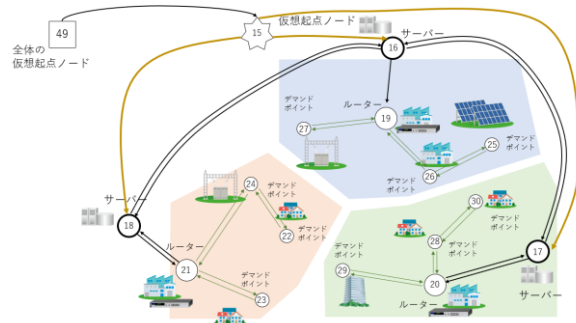
(2) 計算結果の考察

破壊される可能性のあるノードは 37 個であり、これらをランダム順に破壊したときの計算結果を示す。ただし、相互依存性を考慮しないケースが図-2(a)、相互依存性を考慮するケースが図-2(b)である。また、2つのケースにおいて異なるランダムシードで 5 回ずつ試行しており、図中の太線が平均値を示す。

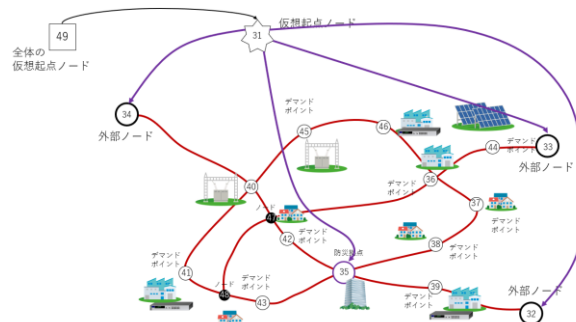
電力供給ネットワークと情報通信ネットワークについて、平均値を示した線を 2 つの図で比較する。破壊ノード数の増加に伴い、相互依存性なしの場合はおおよそ直線に近い形で接続ノード率が低下するのに対し、相互依存性ありの場合は全体の半分を破壊する以前に急激に接続性が失われることがわかる。また、後者では電力供給での接続ノード率が低下するのに伴い、情報通信での接続ノード率も連関して低下することが明らかである。なお、交通ネットワークはほぼ独立しているものとしたため、電力供給や情報通信における接続性低下の影響は他



(a) 電力ネットワーク



(b) 情報ネットワーク



(c) 交通ネットワーク

図-1 仮定の 3 インフラネットワーク

表-1 異なるネットワーク間の相互依存

依存元→ 依存先	相互依存関係例	ノード
電力供給→ 情報通信	電力供給がなければ 情報通信ができない	3→25, 4→27, 5→24, 6→19, 7→26, 8→30, 9→28, 10→20, 11→29, 12→22, 13→23, 14→21
情報通信→ 電力供給	情報通信がなければ 発電所・変電所を制 御できない	25→3, 27→4, 24→5
電力供給→ 交通	電力がなければ防災 拠点が機能しない	11→35
情報通信→ 交通	情報通信がなければ 防災拠点機能しない	29→35

2つと比較して大変小さいものとなる。したがって、提案したモデルは相互依存性に関する脆弱性の相関関係を

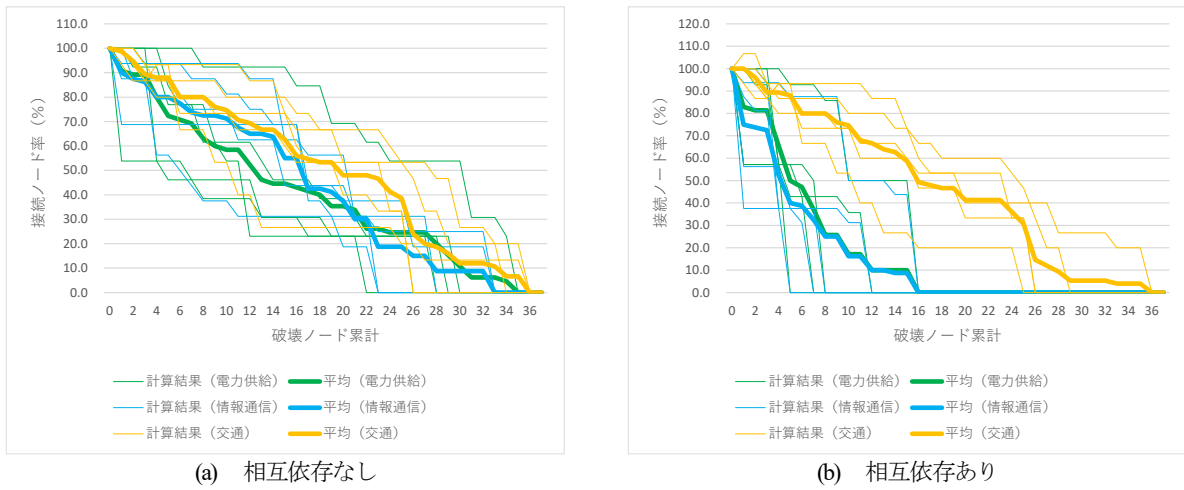


図-2 ランダム破壊の結果

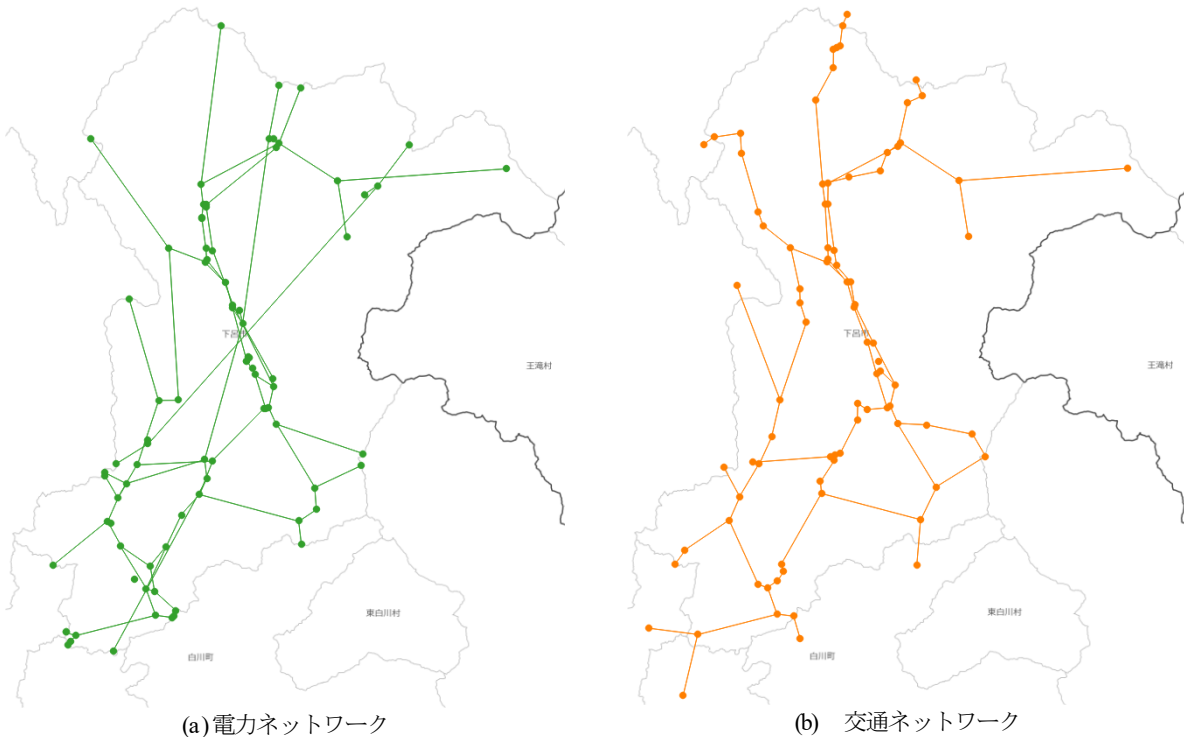


図-3 下呂市ネットワーク

表現可能であることが確認できた。また、本計算に要した時間はおよそ5秒であった。

4. 下呂市ネットワークにおける実証評価

(1) ネットワークの設定

次に、岐阜県下呂市における道路ネットワークおよび送電網・配電網をもとにしたネットワークを作成し接続性や脆弱性の評価を行う。

交通ネットワークを作成するにあたり、下呂市における国道・県道ネットワークを選定した。ただし、最も下呂市に近い市外ノードは外部ノードとして残し、下呂市内外を結ぶリンクは各自治体の外部ノードと下呂市内の

ノードを繋ぐものとした。また、下呂市役所との距離が最小のノードを防災拠点を選定し、その他のノードはデマンドポイントとする。さらに、リンクはすべて簡略化のため直線化する。仮想起点ノードから外部ノードおよび防災拠点へ繋ぐ12個の片方向リンクを合計すると、ノード数87、有向リンク数200のネットワークとなる。

次に、電力ネットワークについて説明する。送電網に含まれるノードとして、発電所・発電施設と変電所を想定する。発電所・発電施設の位置や名称は、中部電力株式会社の各種資料³⁶⁾、国土数値情報ダウンロードサービス³⁷⁾の「発電施設(ポイント)」を参照する。変電所に関しては、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³⁸⁾を参照す

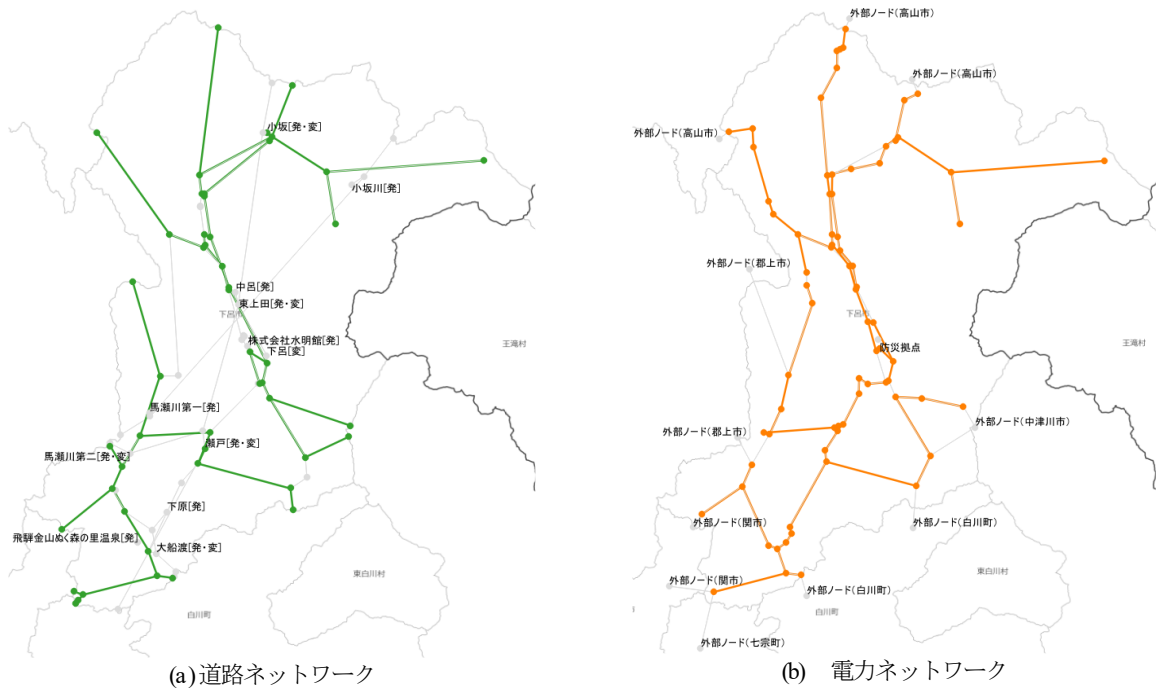


図4 下呂市ネットワーク障害がないケースでのPCST

る。発電所・発電施設および変電所間を接続する送電線については、地理院地図と Google Maps の航空写真レイヤーを参考に作成する。なお、下呂市の外縁部分・送電線の境界部分にもノードを設定することで送電線を区切ることとする。次に、配電網については、下呂市道路ネットワークのデータにおいて、交差点または道路終端部に位置するノードをデマンドポイントと設定する。また、配電線については、電線が道路の隣接インフラとして、架空もしくは地中線の形で敷設されているものと仮定し、原則道路ネットワークに沿った状態を想定する。配電用変電所に最も近い位置に存在するデマンドポイントに変電所からの片方向リンクを繋ぐことで送電網と配電網の接続を表現した。仮起点ノードから発電所・発電施設へ繋ぐ 11 個の片方向リンクを合計すると、ノード数 85、有向リンク数 181 のネットワークとなる。以上の結果得られたネットワークを図3に示す。

次に、2つのネットワーク間の相互依存を考える。ここでは簡単に、交差点や道路終端部など、同一地点に存在するノード間に相互依存関係を設定することとする。ノード付近の数字はノード番号を表す。当ネットワークにおいて、相互依存関係にあるノードは 66 個 (33 組) となった。

(2) 障害がないケースでの計算結果

以上のネットワークを用い、ノードに障害が発生していない条件下での接続状態およびランダム順破壊の計算を実施する。各ノードの賞金は 100 に、リンクのコストは一律 1 とし、可能な限りデマンドポイントを接続する設定で計算した。計算の結果、電力供給ネットワークで

は小坂発電所・変電所と瀬戸発電所・変電所に流入、2か所より下呂市内に展開する木が導かれた。また、交通ネットワークでは防災拠点より下呂市内に展開する木が導かれた (図4)。図中の灰色のノードおよびリンクは、利用または接続されていないものを表す。図のように、すべてのデマンドポイントとの接続性を確保できる最小ツリーを求めることができ、それ以外のリンクは冗長性を確保していると解釈できる。

(3) 脆弱性評価

次に、脆弱性評価を実施した。乱数を用いネットワーク上のノードをランダムに被災 (不通化) させた上で PCSTP を解き、接続ノード率を計算する。横軸に破壊ノードの累積数を取り、接続ノード率の減少によりネットワークを評価する。なお、乱数の影響を排除するため、異なるランダムシードで 10 回の計算を行い、破壊されたノードの増加に伴う接続ノード率の遷移を、相互依存性なし、交通から電力供給への片方向依存性あり、相互依存性ありの 3 ケースに分類し、電力供給ネットワーク、交通ネットワーク別に示す (図5)。縦軸が接続ノード率、横軸が破壊ノード累計、赤線が各計算結果の平均値を表している。また、グラフは上から相互依存なし、交通から電力への片方向依存、相互依存性ありの順に示している。図を見ると、相互依存性が高まるにつれてグラフは左側に遷移、すなわちより脆弱性が高い方向に移行することが確認できる。さらに、各試行回の結果を表す実線と平均値を表す赤線を比較すると、電力ネットワークの方がより破壊ノード数が少ない段階から試行回の変動が大きくなっている傾向にあるようである。つまり、

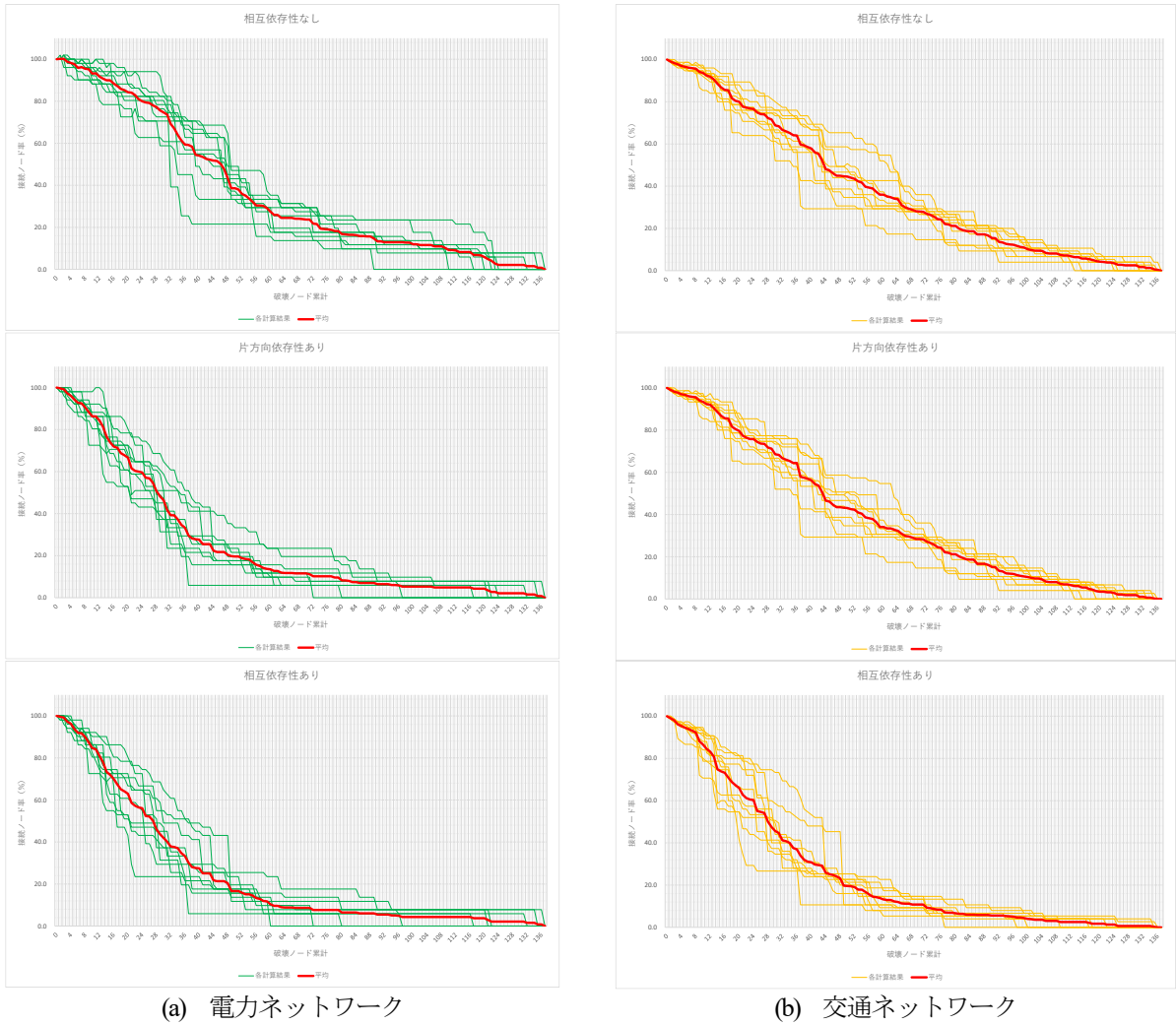


図-5 脆弱性評価

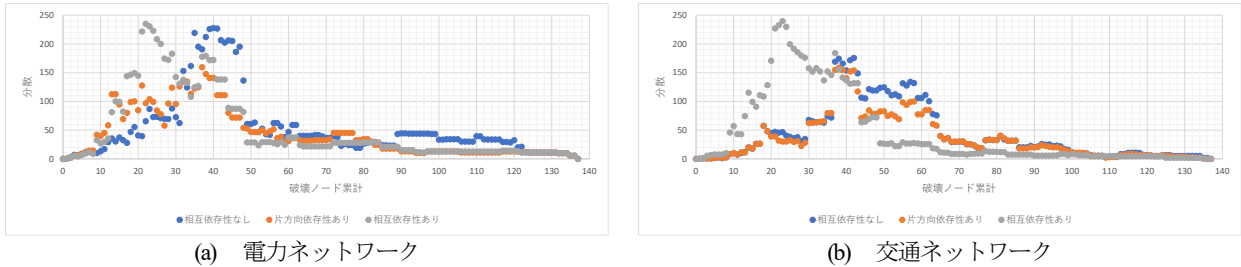


図-6 計算結果の分散

破壊ノードの順番によっては大きく接続性が失われるケースも存在することが確認できる。このような、計算ケースによる結果のばらつきを考察するために、10 ケースの計算から算出できる分散を図-6 に示す。

図より、相互依存性による計算結果の差を確認すると、相互依存性がないケースよりも片方向依存性のケース、片方向依存性のケースより相互依存性があるケースの方が、より破壊ノード累計が小さい段階で分散が増加していることが確認できる。また、交通ネットワークについては、片方向において影響を及ぼす元であるため、依存性なしと片方向の結果がほとんど変わらない。このように、計算結果の分散も脆弱性を測る有効な指標であると

いえる。

(4) クリティカルノードの同定

図-6より、破壊されるノードによっては接続性が大きく変化することが確認できた。では、そのようなネットワーク全体に大きな影響を及ぼすノードを抽出できないだろうか。ここでは、10回の計算において、各ノードが破壊された時の接続ノード率の低下率の平均値（接続低下率）をもって評価することとした。ノード毎の接続低下率を可視化したものを図-7に示す。円の大きさと接続低下率は比例しており、青色のノードは破壊されないことを意味する。2つの図の概形を俯瞰すると、双方とも

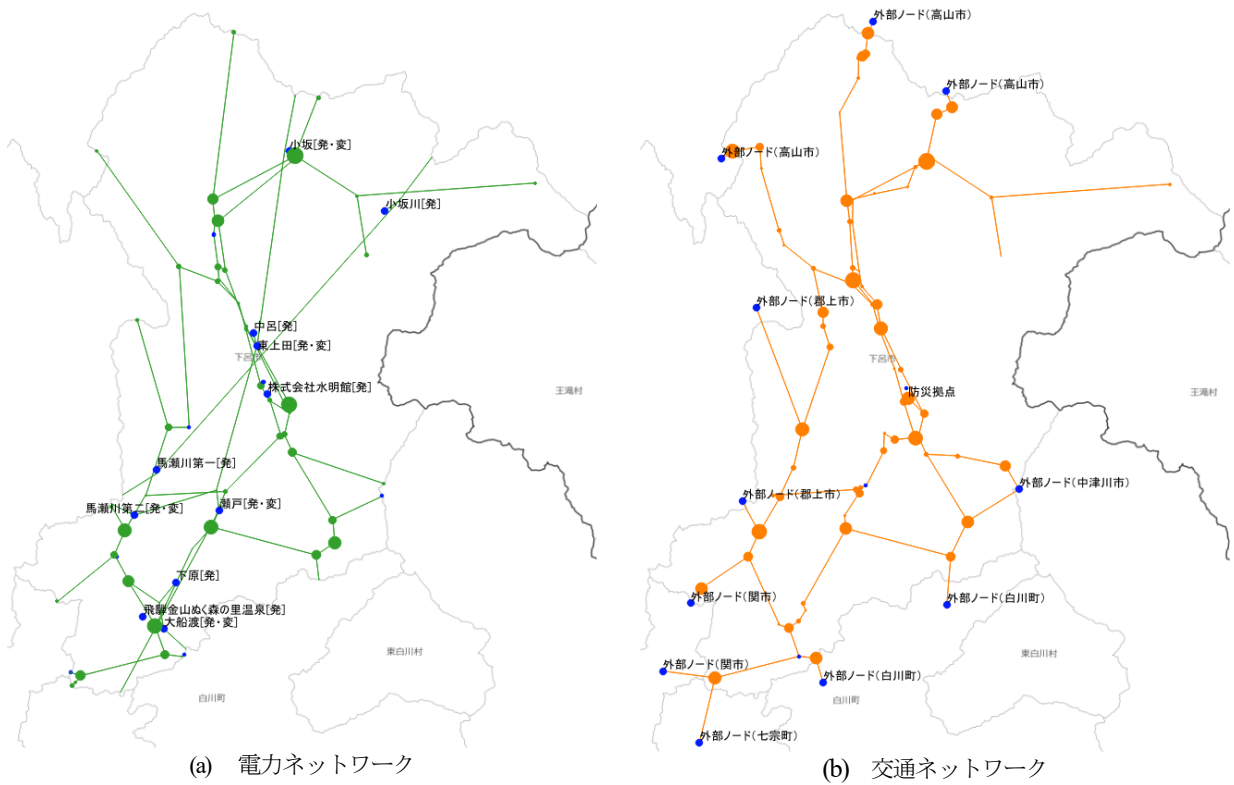


図-7 接続低下率

青色の破壊されないノードの付近に接続低下率が大きいノードが位置しており、また、交差点等の次数が大きいノードでは円が大きくなる傾向がみられる。また、馬瀬地域や防災拠点付近など、電力ネットワークと交通ネットワークで同位置にクリティカルノードが位置しているケースもあり、これらのノードの被災がネットワークに及ぼす影響は大きく、何らかの対策が必要といえるだろう。

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、電力供給システム、情報通信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。その結果、以下の知見を得た。

- 相互依存関係がみられるインフラが構成するネットワークの評価において、賞金収集シュタイナー木問題 (PCSTP) を用いた最大流問題としての定式化は、ノード数が 200 程度で従来の PCSTP の考えを適用した際は最適解を求めることが困難とされるネットワークにおいても、サブツアーの形成回避や相互依存条件が設定可能であり、また計算時間の観点からも十分に実用性があると判断できる。

- ランダムシードでの複数回の計算をもとにした破壊ノード数に対する平均接続ノード率の変化や接続ノード率の分散を指標とする脆弱性の評価は、異なるノード数をもつネットワークにおいても定量的な評価が可能である。加えて、繰り返しにより乱数の影響を排除した精度の高い計算結果が得られるとともに、接続ノード率の変化に着目することで特定ノードが内包しているネットワークへの影響度がわかる。
- ネットワークの作成において、仮起点ノードを設置したうえで本地点からフローが生じ、またデマンドポイント等の生活拠点を想定した地点への接続を確保するという設定は、ツリー構造として接続の様子が可視化可能であり、被災時にネットワークに生じる障害の程度の理解が容易である。
- 接続ノード率が急激に低下する際は、同一の破壊ノード累計においても乱数の影響を受けてノード毎の接続低下率に大幅な差が発生する。さらに、相互依存性により接続性や脆弱性に明確な差異がみられる。

以上のように、本研究で提案した手法は今後のインフラネットワークの相互依存の帰結として生じうる新たな脆弱性を評価可能であると考えられる。

一方で、今回は計算手法の開発に主眼を置いたため、今後検討すべき課題も多い。以下に課題を列举し、本稿を閉じることとする。

- 今回想定した相互依存性は、交通と電力ネットワークにおけるノードの隣接性のみであった。例えば、

道路区間の被災による電力リンク途絶など、様々な相互依存性が考えられ、これらの表現方法についての整理が必要である。

- 交通ネットワークについて、単純な道路ネットワークで表現したが、本来はガソリン車両、EV の違い、そして自家用車、公共交通の違いによっても電力や情報通信ネットワークの相互依存性は異なる。したがって、交通ネットワークを多層化し、それぞれのネットワーク依存性を考慮可能となるようモデルを拡張する必要がある。
- 交通ネットワークにより輸送するのは人あるいは物資であり、それらは一時的に滞留（保管）可能である。そのため、道路ネットワークの影響評価としては接続の有無に着目すれば十分といえる。一方で、電力は一般には保管することができない。したがって、電力ネットワークの接続性評価に関しては、「単位時間に必要とされる電力を提供できているか」という接続性だけでなく供給可能電力量についても評価すべきである。
- 脆弱性を適切に評価するためには、地域において生じうる災害を想定する必要がある。今回の計算においてはランダムにノードを破壊しており、今後災害シナリオに応じた適切な破壊想定が必要である。
- 本研究の最終目標としては、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ネットワークデザイン手法（NDP）を構築することである。一方で、今回定式化したPCSTPは、混合整数計画問題となっており、その求解は特に大規模ネットワークでは容易ではない。そのため、NDPに拡張する際のモデルの簡略化について検討の余地がある。

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、應江黔教授、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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 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>)
- 内閣府，“Society 5.0 - 科学技術政策 - ” (https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/)
- 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.
- Ljubic, I, “The Prize-Collecting Steiner Tree Problem” (<https://homepage.univie.ac.at/ivana.ljubic/research/pcst>)
- 中部電力グループレポート2020（統合報告書），中部電力，(https://www.chuden.co.jp/resource/csr/csr_report/csr_bk_report_2020.pdf), 2022/01/26 アクセス)
- 水力発電所一覧-中部電力の水力発電所，中部電力，(https://www.chuden.co.jp/energy/renew/water/wat_chuden/wat_list/) (2022/01/26 アクセス)
- 国土数値情報ダウンロードサービス，国土交通省，(<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>) (2022/01/26 アクセス)
- 電力系統利用ルールおよび当社系統情報等の公表・託送供給などのご案内，中部電力パワーグリッド，(https://powergrid.chuden.co.jp/goannai/hatsuden_kouri/takuso_kyokyu/rule/) (2022/01/26 アクセス)

VULNERABILITY EVALUATION MODEL FOR TRANSPORT, POWER SUPPLY AND COMMUNICATION NETWORK CONSIDERING INTERDEPENDENCY

Fumitaka KURAUCHI, Kota ISHIGURE and Shodai MATSUSHITA