

インフラネットワークの相互依存性を考慮した接続脆弱性評価手法の構築

岐阜大学 学生会員 ○松下 祥大

岐阜大学 正会員 倉内 文孝

1. 研究背景・目的

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・電力・情報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. 交通・電力・情報インフラの相互依存関係

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。

3. 接続性評価問題の定式化

3.1. 接続判定モデルの構築

被災後の接続性を考察するために、ここでは賞金収集シュタイナー木問題(Prize Collecting Steiner Tree Problem, PCSTP)³⁾を用いた接続性評価を行う。この問題は、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できる。シュタイナー木を得るための問題は、一般に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。

$$\min_{x,y,f} \sum_{a \in A^T} c_a^T x_a^T - \sum_{n \in N^T} p_n^T y_n^T$$

Subject to

$$\sum_{a \in A_{n+}^T} x_a^T - y_n^T = 0, \forall n \in N^T \setminus r^T$$

$$y_r^T = 1$$

$$f_a^T \leq |N^T| x_a^T, \forall a \in A^T$$

$$\sum_{a \in A_{r^T}^T} f_a^T = \sum_{n \in \setminus r^T} y_n^T$$

$$\sum_{a \in A_{n+}^T} f_a^T - \sum_{a \in A_{n-}^T} f_a^T = y_n^T, \forall n \in N^T \setminus r^T$$

$$y_n^T \in \{0,1\}, \forall n \in N^T$$

$$x_a^T \in \{0,1\}, \forall a \in A^T$$

$$f_a^T \geq 0, \forall a \in A^T$$

ただし、 c_a ：リンク a の敷設コスト、 x_a ：リンク a を敷設するなら1そうでなければ0をとる二値変数、 p_n ：ノード n を接続することで得られる賞金、 y_n ：ノード n が接続されていれば1そうでなければ0をとる二値変数、 r ：仮想出発ノード、 f_a ：リンク a の疑似フロー、 A ：リンク集合、 N ：ノード集合、 $A_{n+(-)}^T$ ：ノード n に流入する(から流出する)リンクの集合である。上添字の T は交通ネットワークを示し、電力、情報ネットワークはそれぞれ E, I と記述する。敷設コストに対する収集賞金を十分大きくすることにより、「物理的に接続可能であるノードは必ず接続する」という解を導くことができる。

3.2. 相互依存性の表現方法

複数のインフラネットワークにおける相互依存性は、ノードの接続の有無を表す二値変数 y_n に相互依存性を加味すれば表現できる。例えば、ある地点 i において電力が喪失した際、情報通信ができなくなることは、それぞれの接続判定を行う y_i^E および y_i^I を用いて

$$y_i^I \leq y_i^E$$

と記述できる。

3.3. 脆弱性評価

接続脆弱性の評価として、ランダムにノードを破壊し、そのときに接続が確保されているノード数を

数えた。これを異なるランダムシードで複数回繰り返すことで、接続脆弱性を評価することとする。

4. 試算結果の考察

4.1. 接続判定モデルの計算結果

電力ネットワークを対象とした仮想ネットワークとその計算結果を図-1に示す。ここでは各リンクの敷設コストを1、各ノードの賞金を100としており、仮起点より赤いリンクをたどることで全ノードに到達可能であることが確認できる。また、リンク上の数値は疑似フローの値を表している。このフローは、自身を含めて接続しているノードの数を表しており、ノード1の発電所からは8つの発電・変電所およびデマンドポイントが、ノード2の発電所には1つの発電所が、ノード3の発電所からは5つの発電所およびデマンドポイントが接続されていることを表している。この疑似フローを考慮することで、シュタイナー木を得る際の課題となるサブツアーを排除することが可能である。

4.2. 脆弱性評価の結果

電力ネットワークに加え、交通、情報ネットワークをそれぞれ作成し、相互依存性の有無による影響を考察する。相互依存ケースでは、情報通信と電力ネットワークは相互に依存しているものとし、いずれか一方が接続されない場合には他方も接続できないこととした。その計算結果を図-2に示す。図-2(a)が相互依存性を考慮しないケース、同図(b)が相互依存性を考慮したケースである。結果を見ると、相互依存性を考慮しない場合は各ネットワークが独立するため、破壊対象ノードの存在するネットワークの獲得賞金のみが減少している。一方、相互依存性を考慮すると、電力および情報ネットワークでの獲得賞金が連関して減少し、非考慮時と比較して少数の総破壊ノード数で接続性が失われることがわかる。また、計算時間に関しては、相互依存非考慮時は5.13383秒、考慮時は4.85908秒となったことから、十分に計算可能である。

5. 今後の方針

一般的に各インフラ間には関連性が存在しており、それぞれ独立したものであるとの扱いは現実に即していない。よって、実際においても再現性や有用性が高い、複雑かつ複数のネットワークへの拡張を行う。さらに、2.で示した関係を各ネットワーク間での制約条件として記述し、相互依存性が接続性に及ぼす影響について分析する。加えて、EVを例とする新技術の普及状況や発災に関するシナリオ分析を通じ、災害発生の空間的相関と接続性の関係を考察するとともに、相互依存性を考慮した防災対策の効果などを

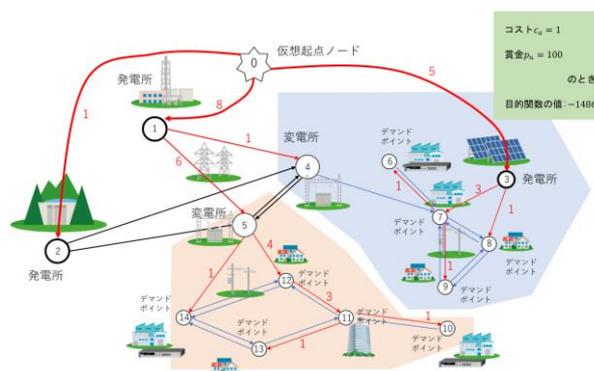


図-1 接続判定モデル適用結果

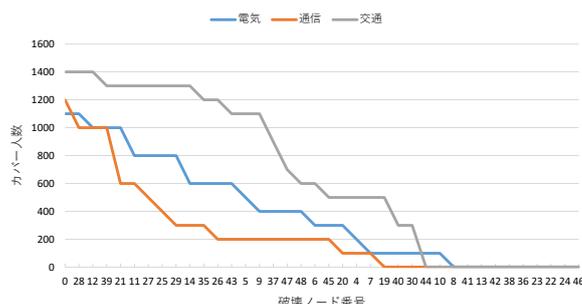


図-2(a) 接続性の変化（相互依存性非考慮）

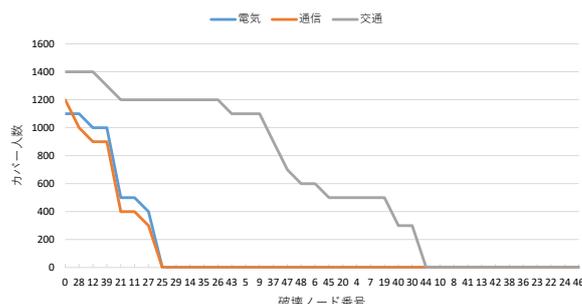


図-2(b) 接続性の変化（相互依存性考慮）

評価する。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H01557 の助成を受け遂行された。ここに記して謝意を表する。

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) 内閣府, “Society 5.0 -科学技術政策-“ (https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/)
- 3) Ljubic, I., “The Prize-Collecting Steiner Tree Problem” (https://homepage.univie.ac.at/ivana.ljubic/research/pct)