

カスケード故障を用いた鉄道ネットワーク廃線波及モデル構築

Constructing an Abandoned Line Ripple Model for Railway Networks by Using Cascading Failures

北海道大学工学部

○学生員 森田一平 (Ippei Morita)

北海道大学大学院工学研究院

正 員 杉浦聡志 (Satoshi Sugiura)

岐阜大学工学部

正 員 倉内文孝 (Fumitaka Kurauchi)

1. はじめに

昨今の我が国では、過疎化や舗装道路の整備による自動車利用の普及などによって鉄道利用者が減少している。そのため鉄道の収支状況は特に地方部において厳しく、板谷¹⁾によれば、1967年以降、40年間にわたって廃止された路線延長は3300kmを上回る。特に北海道では地方部の過疎化、舗装道路の整備だけでなく、石炭産業や林業の衰退などの理由から鉄道利用者が大幅に減少しており、ここ40年ほどの間に鉄道路線が1500km以上廃止されている。また、JR北海道は2016年に単独で維持困難な路線についての報告書を発表、地方部におけるインフラとしての鉄道の在り方が問われるような状況となっている。

鉄道廃線の議論は経済学、統計学、社会学、合意形成、公共政策学など様々な因子が絡む複雑な問題となっているが、本研究では所要時間の変化が必要に与える影響についてネットワーク科学的観点から考える。特に道路網の整備によって鉄道需要が減少し、鉄道路線の減便・廃止が行われるような状況を考えて場合、一部の区間の減便や廃止の影響が引き金となり、利用客が鉄道から自動車へと遷移していく可能性が考えられる。本来、鉄道廃線問題は収益だけでなく廃線による社会的影響を踏まえて総合的に判断されるべきものである。しかしながら、本研究では鉄道ネットワークが収支に従って減便や廃線の意思決定をしたとき、どのような過程を経てネットワークを変遷するかを分析可能とするためのツールを提供する。これは、今後も人口減少が予想される地域において鉄道の維持に関する議論に有用な情報を与えるものとする。以上から、本研究では、この遷移過程を表すために鉄道・道路ネットワークを構築し、鉄道路線の減便・廃止影響がネットワーク全体へ波及するモデルを構築する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

2.1 既往研究の整理

ネットワーク科学の分野では交通、通信、電力といった複雑なネットワークの頑健性について平均距離や次数分布といった指標から考察を行っている。Albert et al.²⁾はリンクが一部のノードに集中して接続されるスケールフリーネットワークにおいて、次数の大きいノード(ハブ)が意図的に選ばれて削除されるような障害の発生に対して脆弱であることを示し、ネットワークのトポロジー(繋がり方)が頑健性に大きく影響していることを指摘した。以後、トポロジーを利用した頑健性に関する研究

は活発に行われ、その理論の1つとして提案されたのがカスケード故障である。元来、カスケードという言葉は数珠繋ぎや連続する、といった意味を持ち、カスケード故障とは連続的な故障と言った意味を指す。Motter and Lai³⁾はノード容量と媒介中心性によって閾値を、媒介中心性によってノード負荷を定義し、負荷の再配分によって閾値を超えたノードが過負荷故障を起こし、更に負荷が再配分される、といったプロセスをカスケード故障と定義した。また、Crucitti et al.⁴⁾は、Motter and Lai³⁾の過負荷故障モデルに対して、ノードが過負荷になった場合、ノードの持つリンクの効率性を低下させるモデルを提案した。杉下ら⁵⁾はカスケード故障の過程において、意図的に選択されたノード除去をすることで損害抑制する手法を提案している。Huang et al.⁶⁾は北京の公共交通ネットワーク(PTN)の頑健性についてカスケード故障の観点から検証した。その結果、PTNはスケールフリー性を持つことが示され、ランダム攻撃に対しては頑健性があるが、意図的な攻撃に対しては最も強度が高いノード(駅)が攻撃されるとネットワークが故障することが示された。これはAlbert et al.²⁾が示した結果と一致し、公共交通ネットワークの頑健性においても同様の特性を持つことを示している。

2.2 本研究の位置づけ

本研究では鉄道と道路を複合したネットワークを作成し、鉄道ネットワークに対してカスケード故障を行うモデルを構築する。具体的にはリンクフローや運行頻度から算出されるリンクの収支を負荷として、鉄道路線の減便(効率低下)・廃線(故障)判定を行うモデルである。本モデルでは効率低下の結果としてリンクを故障させる過程を取っているためMotter and Lai³⁾の過負荷故障モデルにCrucitti et al.⁴⁾の効率低下の概念を入れて応用させたモデルであるとも考えられる。また、本モデルは収支を基準としてリンクの効率低下・故障を判定するため、従来の研究で行われてきたリンクフローや媒介中心性によってリンクの効率低下・故障判定が行われるものとは考え方が異なる。

3. モデル定式化

3.1 記号定義

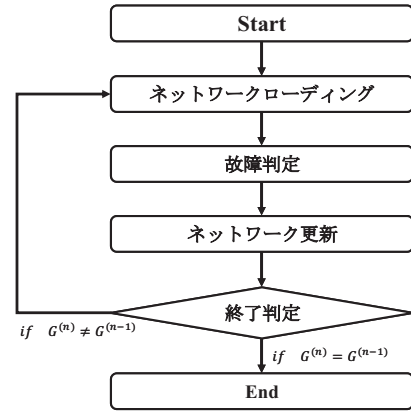
- H : ネットワーク上の路線の集合
- h : 路線を示すインジケータ($h \in H$)
- δ_h : 路線 h の経路分担率
- f_h : 路線 h の運行頻度

- A : 鉄道網内に存在するリンク集合, その成分は $a \in A$ で表す
 P^* : ある駅間における hyperpath セット. 繰り返し過程における魅力的な leg 集合を $p^{(i)}$ とする
 et^* : ある駅間における期待最小所要時間. 繰り返し過程における期待所要時間を $et^{(i)}$ とする
 α : 規則性パラメータ
 U : Section の集合, その成分は $u \in U$ で表す
 G : グラフ
 N : ネットワーク上のノード集合, その成分は $n \in N$ で表す
 E : 鉄道ネットワークの P-Space network に存在するリンク集合, その成分は $e \in E$ で表す
 R : 道路ネットワークを最短経路所要時間で抽象化したネットワークのリンク集合, その成分は $r \in R$ で表す
 Ψ : 経路分担率行列. その成分は $\psi_{(e,a)} \in \Psi$ で表す
 T : グラフ $G(N, E \cup R)$ の所要時間集合
 Et : 鉄道ネットワークの P-Space network に存在するリンクの期待最小所要時間集合
 rt : 道路ネットワークのリンク移動時間集合
 s : 出発駅を示すノード ($s \in N$)
 t : 到着駅を示すノード ($t \in N$)
 Λ : グラフ G のリンクパスインシデンス行列
 q_{st} : OD ペア (s, t) の所要時間(待ち時間+移動時間)
 $\dot{\Psi}$: リンクパスインシデンス行列の変換行列
 d : OD 需要のベクトル表記, (s, t) 間需要は d_{st} で表す
 X : 鉄道のリンクフロー行列, リンク a のリンクフローは x_a で表す
 φ_a : リンク a の運賃収入
 F : 単位距離あたりの運賃
 $l_{(a)}$: リンク a の距離
 ϕ_a : リンク a の運行経費
 O : 単位距離あたりの運行経費
 ω : 列車 1 本あたりの運行経費(円/本)
 δ_a : 1 時間あたりにリンク a を利用する列車数
 λ_a : リンク a の収支
 λ : 減便基準値
 γ_{ha} : 路線 h に属するリンク a
 θ_a : リンク収支 λ_a が減便基準値 λ を下回るかの判定パラメータ
 η_h : 減便基準値 λ を下回った路線が路線 h に存在するかの判定パラメータ

なお、以降多くの定義が異なるネットワーク上にそれぞれ定義の異なるリンクが含まれ、これらによってモデルを表現する必要がある。したがって、ただリンクと呼べば誤解を生じかねないため、鉄道ネットワークの駅間のリンク a を L-link、道路ネットワークのリンクを含む P-Space network 上のリンクを P-link と呼ぶ。

3.2 カスケード故障モデルの概要

本研究ではリンクベース過負荷故障モデルをベースとしてモデルを構築する。リンクベース過負荷故障モデルでは次のような一連の事象を考える。平常時において、



図—1 モデルのフローチャート

リンクは負荷であるフローに対し余裕を持った処理能力を有する。ただしネットワーク上のリンクに障害が発生した場合フローは再分配され、このフローがリンクの処理能力を超過する場合、過負荷により故障するリンクはさらに生じる。このように一つの障害により連鎖的にリンクが故障する事象を表現するモデルである。モデルのフローチャートは図—1 で示される。

提案モデルでは OD 需要は一定であるとする。また、鉄道ネットワーク以外に道路ネットワークを考慮する。ただし、道路ネットワークはリンクに収支や故障が存在せず常に同じネットワークを維持すると仮定する。この仮定により、収益が確保されず、鉄道ネットワークの減便により鉄道利用に対するサービスレベルが低下することで、道路ネットワークを利用する人が増加することとなる。これにより過負荷故障が連鎖する、一般に指摘されている事象を表現可能となる。

3.3 ネットワークローディング

(1) 概要

ネットワークローディングでは鉄道路線データ、道路データをインプットデータとする。道路データは2点間の単純化された所要時間をもつリンク、鉄道路線データは移動時間以外に公共交通特有の要素である路線とその運行頻度の情報を所与とする。乗客は鉄道の運行情報を時刻表ではなく運行頻度により認識するものと仮定すると、列車には待ち時間が存在するため、乗客の最短旅行時間経路はその乗車時間を最短とする経路とは限らない。そこで、乗客は所要時間と待ち時間の和である期待所要時間を最小とする行動をとるものとして考える。鉄道路線網の情報をネットワークへ導入する方法として、本研究では P-Space Network⁷⁾ を導入し、最短経路探索を行う手法を利用する。P-Space Network とは乗り換えなしで移動可能な駅ペアに対して、期待所要時間を持つ leg と呼ばれるリンクが張られたネットワークのことである。P-Space Network を利用して駅間の待ち時間と乗車時間を考慮した最小の期待所要時間を算出する必要があるが、この算出には Hyperpath⁸⁾ の概念を導入し、その詳細については次項にて説明する。

(2) 鉄道ネットワークの P-Space Network と期待最小所要時間の算出

leg は路線 ID, 起点駅, 終点駅, 所要時間, 運行頻度を属性としてそれぞれ持つ. ここでの所要時間とは路線の待ち時間と所要時間の和で表される. 直行のみで移動可能な路線が複数存在する場合, すなわち P-Space Network のある駅ペア間に複数の leg が存在するとき, その期待所要時間を最小とする魅力的な leg 集合 (attractive set) を Hyperpath によって求め, この leg 集合を section と定義する. section には乗車駅, 降車駅, 期待最小所要時間, 運行頻度, 利用される leg 番号を属性として持つ. 期待最小所要時間の計算は以下の手順に従う.

Step 0: 当該駅ペアを結ぶ leg について, 駅間所要時間の短い順に並べ, $1, 2, \dots, I$ とラベル付けする.

$$\text{Set } i = 1 \text{ (繰り返し番号)}, \mathbf{P}^{(i)} = \{1\},$$

$$et^{(i)} = \frac{\alpha + t_1 f_1}{f_1}. \quad (1)$$

Step 1: i の番号を更新する. もし, 現在の期待所要時間 $et^{(i-1)}$ より追加する路線の所要時間 t_i が長い場合は Step 3 へ行く.
 $i = i + 1$.

If $et^{(i-1)} - t_i < 0$ goto Step 3.

Step 2: 路線 i を hyperpath のセット $P^{(i)}$ に加え, 期待所要時間を計算. Step 1 に戻る.

$$et^{(i)} = \left(1 - \frac{f_i}{\sum_{h \in P^{(i)}} f_h}\right) et^{(i-1)} + \frac{f_i t_i}{\sum_{h \in P^{(i)}} f_h}. \quad (2)$$

Goto Step 1.

Step 3: hyperpath セットと期待最小所要時間を返す.

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{p}^{(i)},$$

$$et^* = et^{(i)}.$$

以上のアルゴリズムによって作成された section の集合 U と, U の起点, 終点ノード情報から作成される P-link 集合 E により鉄道ネットワークグラフ $G(N, E)^{(n)}$ を作成する. また, 各 section における路線 a の経路分担率を $\psi_{(e,a)}$ とし, E における路線の経路分担率行列 Ψ を構成する. $\psi_{(e,a)}$ は (3) 式で表せる.

$$\psi_{(e,a)} = \frac{f_a}{\sum_{a \in E} f_a} \quad (3)$$

(3) 道路ネットワークの追加

(2) で出力された鉄道ネットワークグラフ $G(N, E)^{(n)}$ に対して, 道路ネットワークを加えたグラフ $G(N, E \cup R)^{(n)}$ を作成する. また, グラフ G における所要時間の集合, $\mathbf{T}^{(n)} = \begin{Bmatrix} Et \\ rt \end{Bmatrix}$ として定義する. 以上の操作より, ネットワークローディングに必要なネットワークが構成される. また, Ψ は鉄道についてのみの経路分担率を示すため, 道路ネットワークの P-link を section として結合させた経路分担率行列 Ψ を以下の通り作成する.

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi & 0 \\ 0 & I_{|R|} \end{pmatrix} \quad (4)$$

これは, Ψ が section に対応する P-link の経路分担率を示し, Ψ より右側列は道路ネットワークの P-link を意味する. (2) で得た section は道路を利用した経路を含まないため, この成分は 0 である. また, 左下の成分は道路ネットワークを想定した section が鉄道ネットワークを含まないため, 0 である. $I_{|R|}$ は道路ネットワークのリンク数の大きさ $|R|$ と等しい大きさの単位行列である. 道路は OD ペア間に経路が一つしか存在せず, 1 つの P-link のみで構成されるため, 全ての対角要素が 1 となる.

(4) 最短経路探索

道路と鉄道ネットワークを結合したグラフ $G(N, E \cup R)^{(n)}$ において, 全ての OD ペアに対して最短経路探索を行い, リンクパスインシデンス行列 $\mathbf{A}$, 最短経路所要時間 q_{st} を得る. (5) 式の演算により, 仮想的なリンクである P-link に負荷されたフロー $\mathbf{d}$ から, 実リンクを示す L-link を通過する需要量 $\mathbf{X}$ を得る.

$$\mathbf{X} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{A} \cdot \Psi \quad (5)$$

3.4 故障判定・ネットワーク更新・終了判定

前述のネットワークローディングによって算出されたリンクフローを基に鉄道路線の減便・廃線判定を行う.

初めに L-link の収支を算出する. L-link の運賃収入, 運行経費, 収支は以下の (6), (7), (8) 式で定義する.

$$\varphi_a = F \times l_a \times x_a \quad (6)$$

$$\phi_a = O \times l_a + \omega \times \delta_a \quad (7)$$

$$\lambda_a = \varphi_a - \phi_a \quad (8)$$

得られた収支 λ_a が減便基準値 λ 未満となる L-link を通過する路線について, 減便・廃線判定を行う. 減便・廃線判定は以下のステップに従う.

Step 0: 収支が減便基準値を下回る L-link を特定する.

$$\theta_a = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_a < \lambda \\ 0 & \text{if } \lambda_a \geq \lambda \end{cases}$$

Step 1: $\theta_a = 1$ となる L-link が路線 h に存在するか判定する.

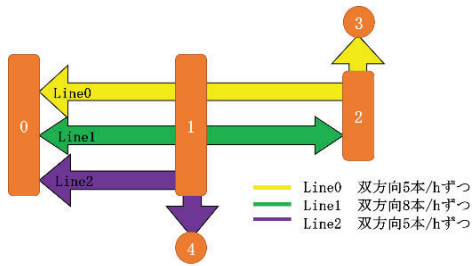
$$\eta_h = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{a \in A} \gamma_{ha} \theta_a \geq 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

Step 2: $\eta_h = 1$ となった路線 h について, 運行頻度を 1 減ずる (減便). この作業の結果, $\delta_h = 0$ となった路線は路線集合から除外, つまり路線を廃止する ($H = H - h$).

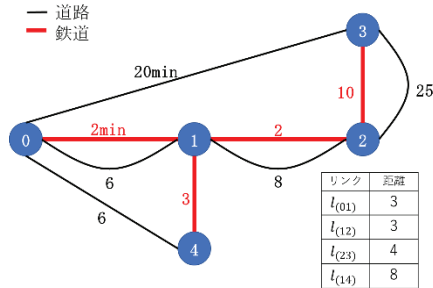
Step 3: 終了判定: Step 2 にて便数を減じる路線がなければ全ての手順を終了し, 得られたネットワーク $G(N, E \cup R)$ を出力する. そうでなければネットワークローディングに戻る.

4. 計算結果

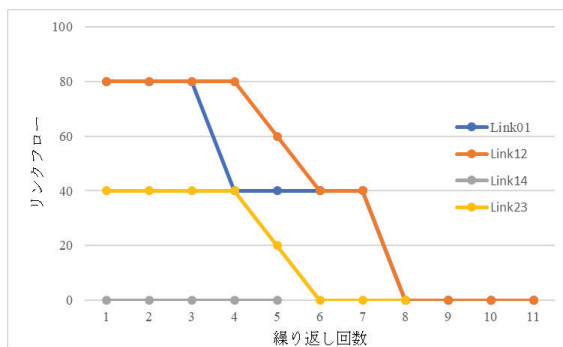
ここでは, テストネットワークを作成し, 実際に計算を行った結果を示す. 各 OD ペアの需要は全て 10, $O = 4000$, $\omega = 1000$, $F = 200$, $\lambda = 0$ とした. 計算はネットワークがこれ以上更新されない状態まで行った. 使用した鉄道網の路線経路と運行頻度を図-2, 鉄道・道路ネットワークを図-3, 計算結果を図-4, 図-5 に示す.



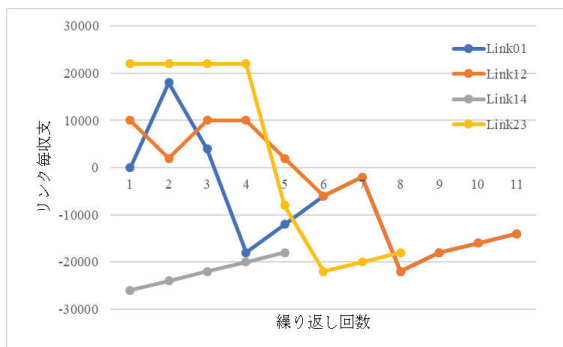
図一2 テスト鉄道網



図一3 テスト鉄道・道路ネットワーク



図一4 繰り返し過程における L-link 交通量



図一5 繰り返し過程における収支

計算結果として 11 回目の繰り返しでネットワーク上の鉄道路線数が 0 となり計算が終了された。これは収支の悪化によって鉄道路線の運行本数が削減された結果、期待所要時間が増加し、利用者がより所要時間の短い道路へと遷移していったためである。ネットワーク故障の引き金となったのは 1 回目の繰り返しで L-link 交通量が 0 であった Link14 である。Link14 の L-link 収支が赤字であったため、Line2 の運行頻度が減少。これに伴い、同じく Line2 が運行されている Link01 の運行頻度も減少し期待所要時間が増加、Link01 は 4 回目の繰り返しで収支が赤字となった。また、収支が赤字になったことで Link01 を利用する路線の運行頻度が減少し、結果とし

て鉄道ネットワーク全体が故障する挙動が示された。

また、7 回目の繰り返し計算では減便によって期待所要時間が増加したものの L-link 交通量は変化せず、列車運行経費が削減されたため、各 L-link の収支が改善方向に向かった。このタイミングで政府や自治体がネットワーク維持のための補助金や支援を投入すると、最少額の補助でネットワーク維持が行えると考えられる。このように提案モデルはカスケード故障の各段階において乗客フローとサービス水準、および収支状況を確認でき、廃線が生じる構造を考察可能である。

5. おわりに

本研究では、鉄道廃線問題においてカスケード故障を用いて鉄道路線の減便・廃止影響がネットワーク全体へ波及するモデル構築を行い、試算を行った。他のネットワークでの試算結果、比較については講演時に報告する。

また、本モデルでは 鉄道と道路の乗り換え制約を課していないため現実の旅行動と違う経路を通ってしまうことがある。そのため、乗り換え制約を導入しモデルを再検討することを今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 板谷和也: 鉄道廃線事例の類型化—関係主体の行動を中心に—, 交通学研究, 2010 年研究年報 ,pp105-114, 2010.
- 2) Albert, R., Jeong, H. and Barabási, A. L. : Error and attack tolerance of complex networks, Nature, Vol. 406, No. 6794, pp. 378-382, 2000.
- 3) Motter, A. E. and Lai, Y. C.: Cascade-based attacks on complex networks, Physical Review E, Vol. 66, p. 065102, 2002.
- 4) Crucitti, P., Latora, V. and Marchiori, M.: Model for cascading failures in complex networks, Physical Review E, Vol. 69, No. 4, p. 045104, 2004.
- 5) 杉下佳辰, 日下部貴彦, 朝倉康夫: カスケード故障に対する意図的ノード除去による防御策の効果, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp I_781-I_792, 2016.
- 6) A.Huang, H.M.Zhang, W.Guan, Y.Yang, G.Zong :Cascading Failures in Weighted Complex Networks of Transit Systems Based on Coupled Map Lattices, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2015, Article ID 940795, 16 pages, 2015
- 7) J. Sienkiewicz and J. A. Holyst : Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland,” Physical Review E, vol. 72, no. 4, Article ID 046127, 11 pages, 2005.
- 8) Nguyen, S. and Pallotino, S. : Equilibrium Traffic Assignment for Large Scale Transit Networks, European Journal for Operational Research, Vol. 37, pp.176-186, 1988.