

カスケード故障理論を用いた鉄道ネットワーク 鉄道廃線波及モデル構築

森田 一平¹・杉浦 聡志²

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)
E-mail:ippeai@eis.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)
E-mail:sugiura@eng.hokudai.ac.jp

我が国の鉄道ネットワークをめぐる環境は厳しく、一層の効率化が要請されている。本研究では、鉄道ネットワークのトポロジー、フロー推移をカスケード故障理論によって表現し、鉄道路線の廃線によって変化するネットワークの分析を可能とするモデルの提案する。鉄道・道路ネットワークを考慮し、道路整備等によって相対的に鉄道のサービス水準が低下した状態を仮定した時、鉄道の一部区間の減便や廃止の影響は鉄道ネットワーク全体のサービス水準を押し下げ、連続的に他路線の需要の減少、減便や廃止を導くことが予想される。このような現象をモデル化することで鉄道路線の減便・廃止がネットワーク全体へ影響を波及させる様子を表現する。構築したモデルは仮想ネットワークに適用され、減便・廃止影響がネットワーク全体へ波及する様子を確認できた。

Key Words: *Abandoned railroad line, Cascading Failures, Network Science, P-Space Network, Hyperpath*

1. はじめに

昨今の我が国における地方部の鉄道めぐる運営環境は非常に厳しくなっている。都市部への人口集中による人口減少、地方産業の衰退、高規格道路や舗装道路の整備による自動車利用の普及等によって地方における鉄道利用者は少なくなっている。実際、1967 年以降の 40 年間にわたって廃止された地方鉄軌道や特定地方交通線は 3300km を上回る¹⁾。特に北海道では石炭産業、林業の衰退、地方部の過疎化、舗装道路の整備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 以上廃線になっている。2016 年には、JR 北海道²⁾が「当社単独では維持することが困難な線区について」という報告書を発表し、北海道を含む地方部における鉄道ネットワークの効率化や再編について議論が必要な状況となっている。

本研究では、鉄道ネットワークの効率化や再編に関する議論のために、再編による影響を分析する手法を提供する。鉄道・道路ネットワークを考慮することで、道路整備等により相対的な鉄道のサービス水準の推移をモデル化する。さらに、鉄道の一部区間の減便や廃止が鉄道ネットワーク全体のサービス水準を押し下げ、連続的に

他路線の鉄道需要の減少、減便や廃止を招く状況をネットワーク科学の分野で構築されたカスケード故障によって表現する。したがって、本研究で提案するモデルは、これら一部区間の減便や廃線の影響が全体へ波及する過程を分析するものである。旅行時間の変化によって旅行者が選択行動を変えた結果、鉄道のリンク収支が変化し、減便や廃線が行われる様子を表現する。提案したモデルを小さな仮想ネットワークに適用し、その挙動を確認する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

鉄道ネットワーク評価に関する研究は既に様々な方法で行われている。渡邊ら³⁾は二酸化炭素排出量の最小化や消費者余剰評価値の最大化という観点から都市間交通のネットワークの最適化を行った。栢元⁴⁾らは、都道府県間の移動をベースとした鉄道・航空ネットワーク上で、利用されるであろう複数の経路を考慮したネットワーク評価手法を提案し、実際にシナリオ分析を行い便益額を算出した。地方部における鉄道ネットワークの評価として、今城⁵⁾は地方鉄道のデータをまとめ、輸送密度が

2000 人を下回ると収支均衡が急激に崩れ、輸送密度が 1000 人未満になると収支率が 150%を超える線区が続出すると指摘している。また、実際にイギリスでは鉄道ネットワーク評価を基とした大規模な路線削減を行った。

British Railway Board⁶⁾は 1963 年に、輸送密度などから算出される収益から鉄道ネットワークを評価したレポート、"The Reshaping of British Railways"を公表し、不採算路線の削減を実行した。また、渡邊⁷⁾は"The Reshaping of British Railways"を取り上げ、鉄道の特性と大規模な路線削減後のイギリスの鉄道の状況についてまとめた。

このように、既往研究を通して様々な鉄道ネットワークの分析、評価方法があることがわかる。その中で、本研究はネットワーク科学のトポロジー的観点からカスケード故障理論を用いて鉄道ネットワークの推移を再現するモデルを提案し、小規模の仮想ネットワークにおいてネットワーク推移の分析が可能か確認を行う。

ところで、ネットワーク科学の分野では人間関係、交通、通信、電力といった複雑なネットワークの頑健性、の検証を行うために、平均距離、次数分布、媒介中心性などといったネットワークを特徴づける量から考察を行ってきた。これら考察過程の中の 1 つとして考えられたのがカスケード故障である。Motter and Lai⁸⁾はノード容量と媒介中心性によって定義されるノード負荷を定め、うえで特定のノードを削除し、負荷の再配分とノードの故障を連鎖させるプロセスをカスケード故障と定義し、モデルを提案した。また、Crucitti et al.⁹⁾は、Motter and Lai⁸⁾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。これらカスケード故障のモデルが研究される一方で、カスケード故障に対する防御策として Motter¹⁰⁾はカスケード故障が連鎖する間に、負荷の低いノードや負荷の高いリンクを意図的に除去することでカスケード故障のサイズを小さくすることを提案した。また、杉下¹¹⁾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。

交通ネットワーク分野におけるカスケード故障の研究として、Wu et al.¹²⁾が OD フローを含めた利用者均衡状態で発生するカスケード故障について検証を行っている。正則格子(RE)、スモールワールド(SW)、ランダム(ER)、スケールフリー(SF)の 4 つネットワークで利用者均衡(UE)の配分を行った結果、SF ネットワークがカスケード故障に対して最も多くのリンク交通量に耐えることが示された。Qian et al.¹³⁾は 1000 ノードの SF 道路ネットワークに延性と回復特性を付与したカスケード故障を検討しており、カスケード故障の発生を阻止し、ロバスト性を高めるには道路の容量を増やすことが重要であると指摘している。Huang et al.¹⁴⁾は北京の公共交通ネットワー

ク(PTN)のロバスト性についてカスケード故障を基に検証した。その結果、PTN はスケールフリーであることが示され、ランダム攻撃に対してはロバスト性があるが、意図的に強度の高いノード(駅)が攻撃された場合ネットワークが故障することが示された。

本研究は鉄道ネットワークと、道路ネットワークの 2 モードを考慮する。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を表現する。これにより過負荷故障が連鎖する、一般に鉄道減便や廃線の議論で指摘されている事象を表現可能となる。

鉄道ネットワークでは公共交通機関特有の要素である路線とその運行頻度をネットワークに付与する。これらを考慮するために P-Space Network を導入し、P-Space Network 上で Common lines problem を解く。Common lines problem を解く方法として、Hyperpath の概念を用いることで待ち時間と移動時間を考慮した期待所要時間を算出する。カスケード故障においては、リンクフローや列車の運行頻度から算出されるリンク収支を負荷として、鉄道路線の減便(効率低下)・廃線(故障)判定を行う。単純なリンクフロー(負荷)で効率低下や故障を判定するモデルではないという点に特徴がある。すなわち、Motter and Lai⁸⁾の過負荷故障モデルに Crucitti et al.⁹⁾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。公共交通機関の特徴でもある運行頻度や路線(運行系統)の情報を鉄道ネットワークに付与していることも特徴といえるだろう。

3. モデルの定式化

(1) モデル概要

本研究ではリンクベース過負荷効率低下・故障モデルを基としてモデルを構築する。リンクベース過負荷効率低下・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、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、過負荷によりリンクの効率が低下する。その結果、再びフローが配分されて効率低下が起こるリンクはさらに生じる。また、効率低下の結果、リンクの効率が閾値を超えた場合にはリンクが故障しフローが再分配され、故障するリンクがさらに生じる。このように一つの障害により連鎖的にリンクが効率低下・故障する事象を表現するモデルである。

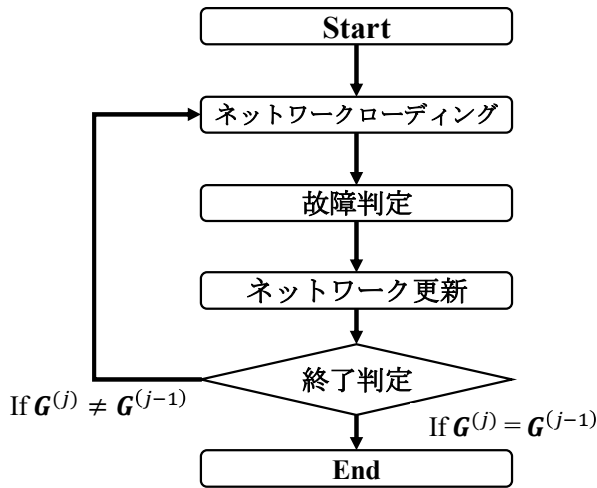


図-1 モデルのフローチャート

過負荷効率低下・故障モデルにおいて鉄道を扱うために、公共交通機関特有の要素である路線とその運行頻度を考慮する。リンクフローの特定のためには路線網内でのネットワークローディングが必要になる。鉄道ネットワークでのネットワークローディングには Common lines problem を利用する。Common lines problem は Hyperpath の概念を用いる方法が Nguyen et al¹⁵⁾により提案されており、この方法を援用して待ち時間と移動時間を考慮した期待所要時間を算出する。Common lines problem を解くアルゴリズムとして Spiess and Florian¹⁶⁾によるフロー保存を用いた解法が挙げられるが、ここでは大規模な鉄道ネットワークでも検討が可能となるよう、Common lines problem に入力するネットワークを簡素化するため J. Sienkiewicz and J. A. Holyst¹⁷⁾が提案した P-Space Network を導入する。

提案モデルでは、リンクフローを、鉄道・道路ネットワーク上を通る旅客量とし、過負荷判定を鉄道リンク収支で行う。鉄道リンク収支は、運行頻度やリンクの距離から成る運行費用と、旅客量とリンクの距離から成る収入から計算される。鉄道リンク収支が閾値を下回った場合、鉄道のリンク効率を低下させる。効率低下はリンク上を通る路線の運行頻度を削減することで表現する。運行頻度の削減の結果、路線の運行頻度が 0 本になった場合、その路線を廃止したと判定する。また、鉄道リンクの故障はリンク上の路線が廃線になることで表現する。廃線はリンク上を通る路線が 0 本になることで表現される。以上のモデル内容について、フローチャートを図-1 に示す。

(2) 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 $p^{(j)}$ 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 $et^{(j)}$ とする
- j : 繰り返し回数
- 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 $e \in E$ で示す
- 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)
- Ψ : 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、ただリンクと呼ばば誤解を生じかねないため、鉄道・道路ネットワーク上

の駅間リンク a を L-link, P-Space network 上のリンクを P-link と呼ぶ。また、鉄道ネットワーク上の L-link を鉄道 L-link, 道路ネットワーク上の L-link を道路 L-link と呼ぶ。道路ネットワークは対象とする 2 点間を直接接続した概念的なリンクで構成し、その所要時間は実際の道路ネットワーク上での経路所要時間を入力するものとする。また、簡単のため容量は考慮しないこととする。

(3) ネットワークローディング

a) 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 Network¹⁷⁾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 Hyperpath¹⁵⁾ の概念を導入し、その詳細については次項にて説明する。

b) 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, ..., I とラベル付けする。

Set $i = 1$ (繰り返し番号), $\mathbf{P}^{(i)} = \{1\}$,
 $et^{(i)} = \frac{\alpha + t_1 f_1}{f_1}$. (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 l 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。

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

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 $G(N, E)^{(i)}$ 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。

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

c) 道路ネットワークの追加

b) で出力された鉄道ネットワークグラフ $G(N, E)^{(i)}$ に対して、道路ネットワークを加えたグラフ $G(N, E \cup R)^{(i)}$ を作成する。また、グラフ G における所要時間の集合、 $\mathbf{T}^{(i)} = \begin{Bmatrix} Et \\ rt \end{Bmatrix}$ 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。b) 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 ペア間に必ずリンクが接続されているため、1 つの P-link のみで構成され、全ての対角要素が 1 となる。

d) 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 $G(N, E \cup R)^{(i)}$ において、全ての OD ペアに対して最短経路探索を行い、リンクパスインデンス行列 $\mathbf{\Lambda}$, 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。

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

(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。

初めに鉄道 L-link の収支を算出する。鉄道 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。

$$\varphi_a = F \times l_a \times x_a \tag{6}$$

$$\phi_a = O \times l_a + \omega \times \delta_a \tag{7}$$

$$\lambda_a = \varphi_a - \phi_a \tag{8}$$

得られた収支 λ_a が減便基準値 λ 未満となる鉄道 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。

Step0: 収支が減便基準値を下回る鉄道 L-link を特定する。

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

Step1: $\theta_a = 1$ となる鉄道 L-link が路線 h に存在するか判定する。

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

Step2: $\eta_h = 1$ 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($H \leftarrow H - h$)。

Step3: 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. 小規模ネットワークでの適用事例と感度分析

(1) 概説

本章では，提案モデルを小規模テストネットワークに適用し，鉄道ネットワークのトポロジーと，フローの推移をシミュレーションする。これにより，一部区間の減便や廃止の影響が鉄道ネットワーク全体のサービス水準を押し下げ，連続的に他路線の鉄道需要減少，減便や廃止が促進される現象が発現するか検証する。また，単位距離あたりの運行経費 O ，列車 1 本あたりの運行経費 ω を変化させたときのネットワーク収支の推移を感度分析する。これら小規模ネットワークでの適用，感度分析を通して，本研究で示したモデルが鉄道ネットワーク効率化や再構築に関する示唆を与えられるか検討する。

(2) 小規模テストネットワーク

モデルの検証には，図-2，図-3 のテストネットワークを用いる。このテストネットワークは 4 つのノード，3 つの路線，5 つの道路リンクから構成される。図-2 は初期状態の鉄道路線と各路線の単位時間あたり (h) の運行

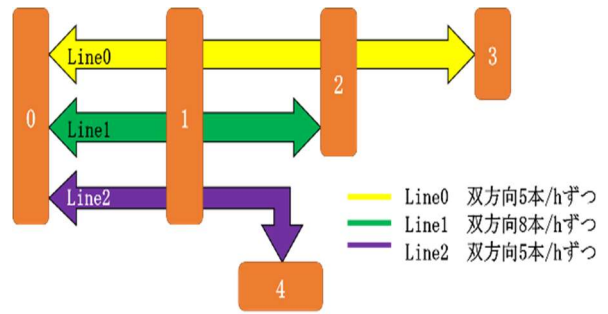


図-2 鉄道路線ネットワーク

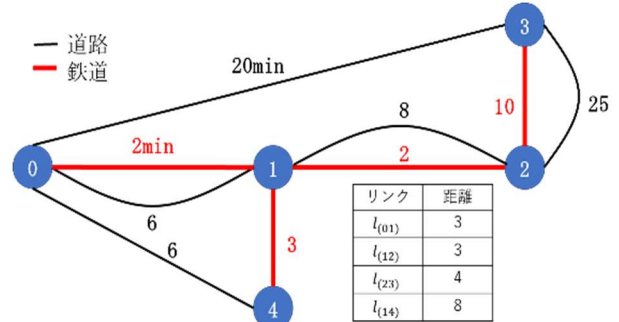


図-3 小規模テストネットワーク

頻度を示している。路線は各鉄道駅間で所要時間をもつものとし，リンクの重みで表現する。鉄道と道路の各リンクの移動時間(min)，および距離は図-3 に示すとおりである。移動時間は利用者のフローを決定するために必要となる一方で距離は運行コストの概算のために利用される。また，図-2 における鉄道路線の L-link 間所要時間には待ち時間が含まれていない。

(3) 試算結果

テストネットワークにおいてモデルを適用した計算の結果を図-4 から図-9 で示す。計算の結果，11 回目の繰り返しにおいて終了判定により計算が終了した。終了判定は，全ての鉄道路線の L-link 収支が閾値以上である，若しくは鉄道路線数が 0 となった場合に適用されるが，今回は図-6 で示す鉄道 L-link 収支より，全ての鉄道 L-link 収支が閾値以下の状態で計算が終了していることがわかるため，鉄道路線数が 0 となり計算が終了したことがわかる。得られた結果を考察しよう。図-4 と図-5 では，それぞれ鉄道と道路の L-link 交通量を示しているが，4 回目から 8 回目の繰り返しにおいて，鉄道の L-link 交通量が減少し，道路の L-link 交通量が増加していることがわかる。各 OD ペアの交通需要は一定であることを仮定していることから，4 回目から 8 回目の繰り返しにおいて，交通需要が鉄道から道路へ遷移している。また，図-6 では各 OD ペアの移動時間を，図-7 ではネットワーク内の総移動時間を示しているが，交通量の変化と同様に，4 回目から 8 回目の繰り返しの中で移動時間が大幅に増加していることがわかる。

以上の図-4 から図-7 までの推移と，図-8，図-9 で示す

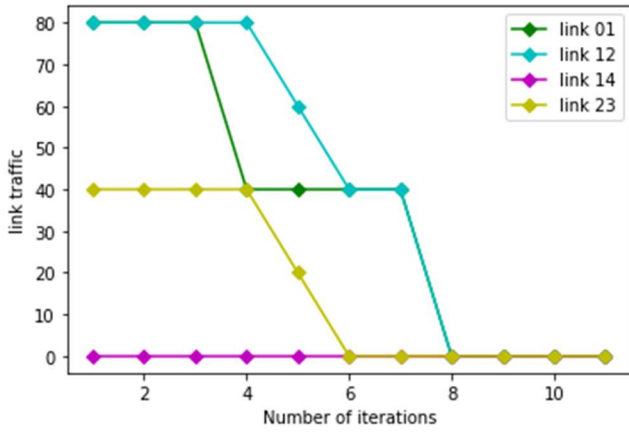


図4 鉄道 L-link 交通量

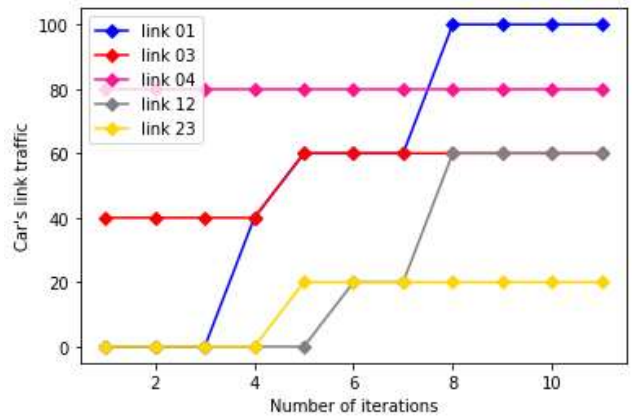


図5 道路 L-link 交通量

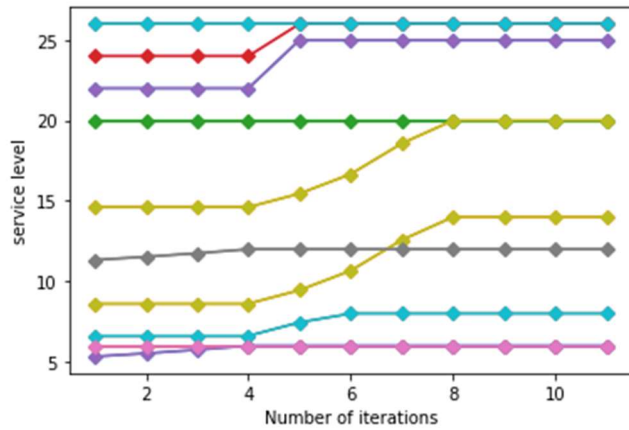


図6 OD ペア毎旅行時間

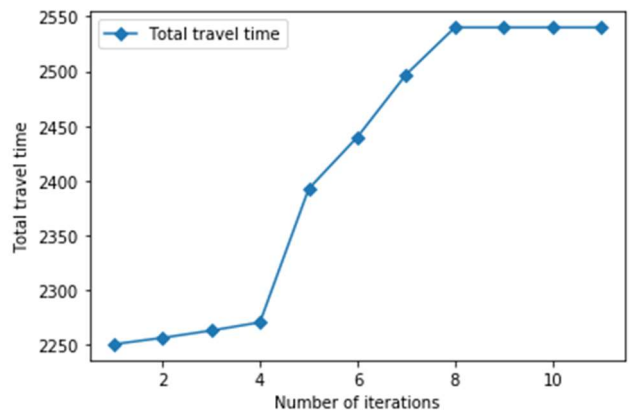


図7 総旅行時間

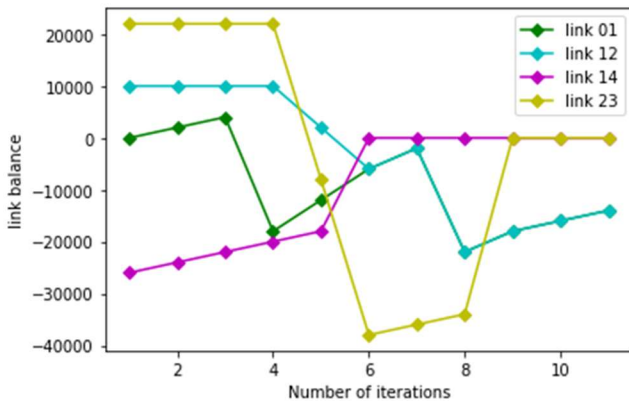


図8 鉄道 L-link 収支

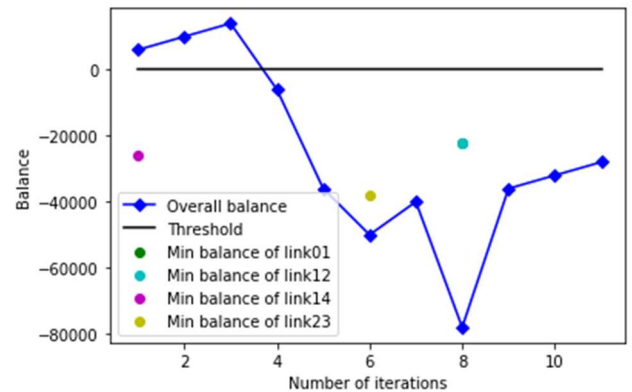


図9 鉄道ネットワーク収支

L-link とネットワーク収支を踏まえ、需要の遷移過程について詳しく考察を行う。モデルの適用事例では 11 回の計算の結果、鉄道路線がすべて廃止された。その中で、link14 がネットワークに与えた影響は鉄道路線すべての廃止の引き金になったと考えられる。図4、図8 で鉄道の L-link 交通量、収支が示されているが、繰り返し 1 回目から Link14 の交通量は 0 であり、収支は閾値である 0 を大きく下回っている。そのため、link14 と link01 を含む Line2 は減便を行う必要が生じ、link14 と link01 の期待所要時間が増加した。また、繰り返し 2 回目以降も link14 の交通量は 0 であり、収支が閾値の 0 を大幅に下回っているため、link14 が廃止される 5 回目の繰り返しまで

link14 と link01 の期待所要時間が増加していることがわかる。特に、link01 の期待所要時間の増加は、道路リンクへの交通需要の遷移を招き、link01 の収支を閾値以下に、そして link01 を通る 3 路線の減便を招いた。3 路線の減便により鉄道利用における期待所要時間は増大し、更なる道路リンクへの交通需要の遷移を生じた。結果、8 回目の繰り返しで完全に鉄道から道路へと需要が遷移し、11 回の繰り返しで鉄道ネットワーク全体が廃線になる過程がみられた。このようにモデルの適用事例から、ネットワークの一部である Line2 の減便、link14 の廃線により、多くの需要が通過する link01 を通る路線の期待所要時間が増大し、ネットワーク全体に一部区間の影響が波

及した過程が読み取れた。また、ネットワーク全体へ影響が波及しないための施策として、路線を分け、黒字の L-link 区間のみ運行頻度を維持するという方法も検討できる。本計算例では、Line2 を link14 と link01 に分け、link14 は減便、link01 は運行頻度を維持するといった施策が考えられる。これは一般の公共交通機関などで行われている施策の 1 つである。

また、ネットワーク全体の収支から、施策の検討をすることも可能となる。図-9 ではネットワーク全体の収支を示しているが、モデルの適用事例では、3 度目の繰り返しまで収支がプラスを示している。4 度目の繰り返し以後、収支はマイナスに転ずることから、3 回目以前の繰り返しの状態で運行頻度を維持すればネットワーク全体の収支、及びサービス水準を維持できることが考えられる。このように全体の収支からネットワーク維持に関する施策の検討が可能である。

モデルの小規模ネットワーク適用事例を通して、鉄道ネットワークのトポロジー、フロー推移を表現することができた。また、ネットワーク全体が廃線になるような事象の引き金となるリンクの検出も可能であることが分かった。ネットワーク全体収支からは、ネットワーク維持に関する施策についての検討が可能であるといえる。

(4) 感度分析

ここではテストネットワークにおける線路整備費用や列車運行費用に関する感度分析を行う。基準となるケースのパラメータ設定は前節と同様に各 OD ペアの需要を全て 10、 $O=4000$ 、 $\omega=1000$ 、 $F=200$ 、 $\lambda=0$ とする。図-10 では、単位距離あたりの運行経費 O を 300 から 6000 まで 300 ずつ変化させた時のネットワーク収支を示しているが、運行経費 O の変化によって収支バランスは大きく 2 つの挙動を示すことが分かった。具体的には、 $O \leq 1800$ の場合、鉄道ネットワークは黒字となり、全路線が廃線となる結果は生じない。その一方で $2100 \leq O$ であれば、全ての路線が廃線となる。つまり、 $1800 \leq O \leq 2100$ の区間で計算終了時の結果が変化する点が存在することが確認できた。このように、単位距離あたりの運行経費 O は廃止を検討するネットワークの推移において重要なパラメータであることが確認できる。

図-11 では、列車 1 本あたりの運行経費 ω を 300 から 6000 まで 300 ずつ変化させた時のネットワーク収支を示しているが、運行経費 ω の変化によって収支バランスは大きく 3 つの挙動を示すことが分かった。 $\omega \leq 400$ では収支が黒字となり、高いサービス水準でネットワークが維持される。 $\omega = 500$ では収支が黒字で収束したものの、 $\omega \leq 400$ よりも低い水準で収束した。また、 $600 \leq \omega$ の場合、全ての鉄道路線が廃止された。このように、経費 ω によっても計算終了時の状態が変化することが確認さ

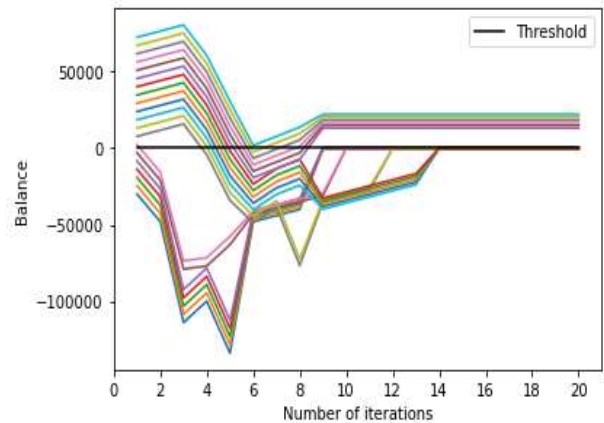


図-10 単位距離あたりの運行経費 O を 300~6000 で 300 ずつ変化させたときの収支バランス変化

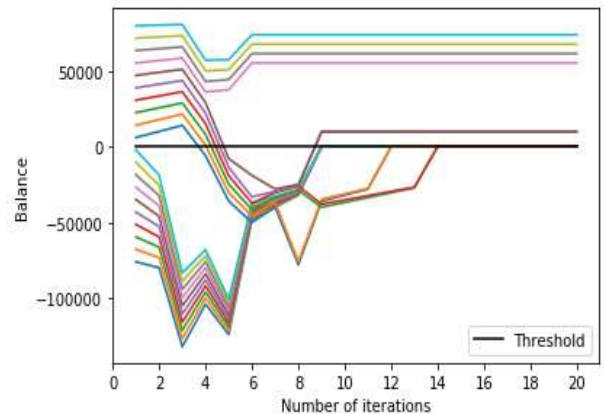


図-11 列車 1 本あたりの運行経費 ω を 100~2000 で 100 ずつ変化させたときの収支バランス変化

れた。以上示したように、運行経費 O 、 ω を変化させたときの収支を示す挙動にはネットワークの維持に関する情報が含まれていた。これは、ネットワークの再構築、維持について議論する際、運行経費の設定、補助や支援の設定などについて検討をする際に有用な情報になると考えられる。

5. おわりに

本研究では、鉄道ネットワークの効率化や再編に関する議論のために、再編による影響を分析する手法を提案した。モデルでは、鉄道ネットワークのトポロジー、フロー推移がカスケード故障理論を用いて表現された。モデルは小規模なテストネットワークに適用され、鉄道ネットワーク全体が廃線されるような事象の引き金となるリンクの検出も可能であることが分かった。また、鉄道ネットワーク全体の収支から、ネットワーク維持に関する施策についての検討が可能であることが示された。モデルの感度分析では、線路の整備費用や列車の運行経費を変化させ、挙動の推移を観察した。挙動の推移には、ネ

ネットワーク維持に関する情報が含まれており、運行経費の設定、補助や支援の設定などについて検討をする際に有用な情報になると考えられた。このように本研究で提案されたモデルは鉄道ネットワーク再編による影響を分析する手法として有用である。

以下、提案モデルの課題もあげる。本研究で構築したモデルは、全ての交通需要が最短経路を選択すると仮定している。しかし本来、利用者には認知誤差が存在し、全員が最短経路を利用するとは限らない。そこで今後のモデルの拡張では利用者の認知誤差を考慮したロジック型の確率的経路選択モデルの導入によりこの課題は緩和されるだろう。また、効用関数に経路コストだけでなく自動車の保有コスト等のパラメータを入れることでより現実的な旅行者の選択行動を表現することができる。

乗り換えに関する課題も挙げられる。モデルでは鉄道と自動車間での乗り換えの抵抗については考慮していない。従って、何度も自動車と鉄道の利用を行うような経路が存在する可能性がある。この問題を解消するためにモデルの中に交通機関を跨ぐような乗り換えに対して制約を追加する拡張により現実の経路選択に近いモデルの構築が可能であろう。

本稿で与えた減便施策に対しても課題が残っている。本稿では閾値を下回った L-link について、そこを通る全ての路線に対して減便する施策を与えた。しかしながら、現実の施策との整合は考えられていない。例えば、路線ベースで 1 番収支が悪化している区間を通過している路線の運行頻度を減らす方法や、1 路線の中で需要が多い区間については減便せず、需要が少ない区間のみ減便を行うような手法などが考えられ、モデルの拡張を行う中でこれらの減便方法が適用可能か検討が必要となる。

鉄道路線網の再編議論は合意形成や公共交通としての意義などを踏まえた多角的な議論が必要であることは認知する。本研究では、複数モードが存在する中でのネットワーク効率性を議論するための 1 つの材料として提案するものであることに留意されたい。また、鉄道路線網を維持するために課題となるものは整備士や運転者の確保など多岐に渡り、本研究で取り扱えていないものが多数ある。これらを考慮したモデルの拡張は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, 54 巻, pp105-114, 2010.
- 2) JR 北海道：維持困難な線区について, 2016, <https://www.jrhokkaido.co.jp/pdf/161215-4.pdf> (2021.09.20 閲覧)
- 3) 渡邊拓也, 柴田宗典, 鈴木崇正：多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価手法に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, I_903-I_916, 2016.
- 4) 栢元淳平, 塚井誠人, 奥村誠：複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークの評価, 土木計画学研究・論文集, 20 巻, pp255-260, 2003.
- 5) 今城光英：地方鉄道の維持と費用負担, 運輸と経済, 64 巻, 第 3 号, pp15-22, 2004.
- 6) British Railway Board : The Reshaping of British Railways, 1963.
- 7) 渡邊亮：『ピーチングレポート』に学ぶ鉄道の特性とローカル線のあり方, 運輸と経済, 78 巻, 第 7 号, pp166-175, 2018.
- 8) Motter A. E. and Lai Y. C.: Cascade-based attacks on complex networks Physical Review E, Vol. 66, p. 065102, 2002
- 9) Crucitti P. Latora V. and Marchiori M.: Model for cascading failures in complex networks Physical Review E, Vol. 69, No. 4, p. 045104 2004.
- 10) Adilson E. Motter : Cascade Control and Defense in Complex Networks, Physical Review Letters, Vol.93, No.9, p098701, (2004).
- 11) 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.
- 12) J. J. Wu, H. J. Sun, Z. Y. Gao.: Cascading failures on weighted urban traffic equilibrium networks, Physica A 386, pp407-413, 2007.
- 13) Yongsheng Qian, Bingbing Wang, Yuan Xue, Junwei Zeng, Neng Wang : A simulation of the cascading failure of a complex network model by considering the characteristics of road traffic conditions, Nonlinear Dynamics, 80, pp413-420, 2015.
- 14) Ailing Huang, H. Michael Zhang, Wei Guan, Yang Yang, Gaoqin 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.
- 15) Nguyen, S. and Pallottino, S. : Equilibrium Traffic Assignment for Large Scale Transit Networks, European Journal for Operational Research, Vol. 37, pp.176-186, 1988.
- 16) Heinz, Spiess and Michael Florian. : Optimal strategies : A new assignment model for transit networks, Transportation Research Part B: Methodological, vol23, Issue2, PP83-102, 1989.
- 17) 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.

(2021.10.1 受付)

CONSTRUCTING AN ABANDONED LINE RIPPLE MODEL FOR RAILWAY NETWORKS BY USING CASCADING FAILURES

Ippei MORITA and Satoshi SUGIURA

The environment surrounding the railroad network in Japan is severe, and further efficiency improvement is required. In this study, we propose a model that represents the topology and flow transition of the railroad network using cascade failure theory, and enables analysis of the network that changes when railroad lines are discontinued. In this paper, we propose a model that can analyze the network changes caused by the closure of railroad lines. By modeling such a phenomenon, we show how a reduction or discontinuation of a railroad line has a ripple effect on the entire network. The model was applied to a virtual network, and we were able to confirm that the effect of the reduction or discontinuation of a railway line spills over to the entire network.