

# 鉄道ネットワーク維持のための 政府負担を最小化する運賃補助スキームの開発

Development of a Fare Subsidy Scheme to Minimize the Government Expenditure for Maintaining Railway Networks

北海道大学工学部

○学生員 佐藤佑樹 (Yuki Sato)

北海道大学大学院工学院

学生員 峪 龍一 (Ryuichi Tani)

北海道大学大学院工学研究院

正 員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

## 1. はじめに

### 1.1 背景

JR 北海道が「当社単独では維持困難な線区について」を 2016 年に発表し<sup>1)</sup>、北海道や沿線自治体で鉄路振興策が検討されている。JR 北海道の大幅な営業赤字の発現から線区の維持が困難である現状が浮かび上がってきた。2020 年における COVID-19 の流行による交通事業者の大幅減収により、JR 北海道のように、多くの地域で鉄道やバスネットワークの廃線議論が出てくると考えられる。

交通ネットワークを存続させるための政策では、上下分離方式や鉄道会社の赤字の一部を補填するなどの支援が検討されている。上下分離方式は、鉄道の運行を担当する会社と、線路などの設備を管理する会社に分割する政策である。国内の実施例としては岐阜県と三重県を通る養老鉄道などがある。鉄道会社の赤字補填の実施例は、福井県と沿線市町からの補助を受ける、えちぜん鉄道がある。

このような赤字補填スキームは民間企業による効率的な運営手法を残せる一方で、JR 北海道のように、ネットワークの規模が広大で、全体で大きな赤字を出している鉄道会社では費用負担者が不明確なため採用しにくい。また、乗客の数が少ないまま赤字補填をすることに、住民の理解が得られない場合もありうる。

そこで本研究では、乗客の増加による鉄道会社の赤字削減を実現するために、乗客へ運賃補助を行う際の政府負担額を最小化するスキームを提案する。

### 1.2 既往研究

鉄道ネットワークに対する運賃補助の研究では、社会的便益の最大化のために理論やスキームが組まれていることが多い。山崎<sup>2)</sup>は、私的交通と公共交通の二択モデルで、公共交通サービスを提供する企業や政府の利潤目標値を設定した上で、社会的便益を最大化するための最適補助金額を考察している。Fearnley et al.<sup>3)</sup>は、ノルウェーでの都市間鉄道を運営する企業に対する、企業の利潤最大化行動が社会的厚生を最大化行動に近づくためのインセンティブを与えるスキームの設計をしている。補助金を決める変数には、乗客数、列車走行距離、提供座席数が挙げられている。これらの変数は相互関係をもち、複数の解をもつ可能性がある。

北海道のように広い領域での将来の交通需要の推計は、

国土交通省においては全国を 416 のゾーンに分割して推計している。GDP や人口推移を基に生成交通量を、現在の交通サービス水準を基にロジットモデルにより分担交通量を推計している。<sup>4)</sup>

### 1.3 本研究の新規性

本研究で提案するスキームは、政府が乗客に運賃補助をすることにより、乗客が増加して採算をとろうとするという点で新しい。加えて、複数の交通モードを考慮でき、変数が割引率のみで単純である。

交通需要の推計時にネットワーク内の相互作用を考慮して、運賃変化の分担交通量への影響を計算している点で新しい。

## 2. 運賃補助スキーム

### 2.1 概要

ここでは、本研究で提案するスキームを簡潔に説明するため、鉄道路ネットワークのみを対象とした議論を進めることにする。次節以降では、ここでの説明したスキームをマルチモーダルネットワーク（以下、MMN とする）に適用した場合の定式化を行う。

既設の鉄道線路ネットワークをオリジナルネットワーク  $G(N, A_r)$  と表現する。各駅をノードとし、駅間線路をリンクとする。各リンクは、維持確定リンクの集合  $(A_r \setminus \hat{A}_r)$  か、廃止検討リンクの集合  $(\hat{A}_r)$  のどちらかに帰属するものとする。維持確定リンクはリンク交通量の多寡に関わらず維持されるリンクである。廃止検討リンクはそのリンク交通量が、次段で説明される目標交通量を上回ると期待される場合は維持され、上回らないと期待される場合は廃止されるリンクである。このネットワークのリンク上を路線が通る。ここで路線とは、停車するノード及び通過するリンク、所要時間、運賃の等しい列車群である。各路線の停車ノード及び通過するリンクは所与とする。各路線の所要時間、運行頻度は所与の定数とする。

このとき、リンク  $a \in \hat{A}_r$  の運賃を割引率  $\omega_a$  に基づいて下げると、そのリンクを通るルートの効用が変化し、鉄道の利用者が増加することが期待される。各廃止検討リンクにはそのリンクが廃止になる基準となる乗客通過量（目標交通量）が設定されているものとする。運賃を値下げしてもその目標交通量を満たせないリンクは需要がないとして廃止される。一方、運賃の値下げによって、

目標交通量を満たせるリンクは維持される。

このようにして廃止検討リンクのうち維持されるリンク（以後、運賃補助リンク）と、維持確定リンクによって形成されるネットワークに対して運賃補助を行う。

運賃補助リンクに運賃補助を行うことにより、維持確定リンクで乗客が増加することが考えられる。維持確定リンクにおける乗客の増加に伴う収入の増加を運賃補助の総額から差し引くことで、運賃補助による乗客増加の波及効果を考慮する。

## 2.2 スキーム内での仮定

本スキームではモデルの都合上、3つの仮定が置かれている。

1つ目は、MMN内での人の移動を考える点である。対象とする交通モードは、鉄道の他に、道路ネットワークを利用する自家用車、バス、さらには空路としての航空である。以下の定式化では、鉄道、バス、航空と同様に道路交通についても、路線とサービス頻度の概念を導入して考えることにする。一般性を失うことなく、道路交通は道路区間、ガソリン代などをそれぞれ路線、運賃に対応させ、サービス頻度が無限大となる公共交通として捉えることができる<sup>9)</sup>点に注意されたい。

2つ目は、運賃計算である。現実のJRの運賃はキロ帯区分ごとに対キロ賃率を乗じた額にターミナルコストを加える、離散的な運賃体系である。一方で、本スキームでは、ターミナルコストを0とし、運賃が乗車距離に連続的に比例すると仮定している。また、MMNにおいて廃止を検討する鉄道リンクのみににおいて、運賃の値下げを行うこととし、その他にリンクの運賃の変更は行わない。

3つ目は、リンク内における混雑が無視される点である。公共交通の計画においては車内における混雑費用の考慮や、車両の乗車定員を超える場合は公共交通を利用できないという場合もあるが、本研究ではこれらについては考慮しない。

## 3. 定式化

### 3.1 記号

本稿で用いる主な記号を示す。

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| $A$           | MMN上のリンクの集合                    |
| $A_r$         | 鉄道リンクの集合                       |
| $\hat{A}_r$   | MMN上の鉄道リンクのうち廃止が検討されるリンクの集合    |
| $S$           | 拡張ネットワークのルートセクションの集合           |
| $N$           | オリジナル（または拡張）ネットワークのノードの集合      |
| $\Pi$         | トリップの起終点（以下ODペアとする）の集合         |
| $\Pi_g$       | 自治体 $g$ 内の駅を起点とするODペアの集合       |
| $K_\pi$       | ODペア $\pi(\in \Pi)$ 間のルートの集合   |
| $C_s$         | ルートセクション $s(\in S)$ のコモンラインの集合 |
| $L$           | 路線の集合                          |
| $\bar{q}_\pi$ | ODペア $\pi$ 間の最大交通需要            |

|                     |                                                                           |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $q_\pi$             | ODペア $\pi$ 間の顕在化した交通需要                                                    |
| $\tilde{q}_\pi$     | ODペア $\pi$ 間の顕在化しない交通需要                                                   |
| $q_\pi^k$           | ODペア $\pi$ 間のルート $k$ の交通量                                                 |
| $P(k, m)_\pi$       | ODペア $\pi$ 間でMMN上のルート $k$ を選択する確率                                         |
| $P(m)_\pi$          | ODペア $\pi$ 間でMMN利用して移動する確率                                                |
| $t_s^l$             | 路線 $l$ を利用してルートセクション $s(\in S)$ 上を移動する際の移動時間                              |
| $p_a^l$             | 路線 $l$ を利用してリンク $a(\in A)$ 上を移動する際の値下げ前の運賃                                |
| $\hat{p}_a^l$       | 路線 $l$ を利用してリンク $a(\in A)$ 上を移動する際の値下げ後の運賃                                |
| $\hat{t}_s$         | ルートセクション $s$ の期待移動時間（道路の場合は実移動時間）                                         |
| $\hat{p}_s$         | ルートセクション $s$ の期待運賃（道路の場合は0とする）                                            |
| $p_s$               | ルートセクション $s$ の運賃値下げ前の期待運賃                                                 |
| $f_l$               | 路線 $l$ のサービス頻度（道路の場合は $\infty$ とする）                                       |
| $\delta_{\pi, k}^s$ | ODペア $\pi$ 間のルート $k(\in K_\pi)$ が、ルートセクション $s(\in S)$ を含めば1、そうでなければ0をとる変数 |
| $\phi_s^a$          | ルートセクション $s$ がリンク $a(\in A)$ 上を通過すれば1、そうでなければ0をとる変数                       |
| $u_s$               | ルートセクション $s$ の効用                                                          |
| $U_\pi^k$           | ODペア $\pi$ 間のルート $k$ を利用する際の効用                                            |
| $\hat{u}_\pi^k$     | ODペア $\pi$ 間のルート $k$ を利用する際の効用の確定項                                        |
| $\tilde{u}_\pi$     | ODペア $\pi$ 間の移動しないときの効用                                                   |
| $S_\pi$             | ODペア $\pi$ 間の移動するときの期待最大効用                                                |
| $S_{\pi, 0}$        | ODペア $\pi$ 間の移動するときの運賃値下げ前の期待最大効用                                         |
| $S_{\pi, w}$        | ODペア $\pi$ 間の移動するときの運賃値下げ後の期待最大効用                                         |
| $v_a$               | リンク $a(\in A)$ の交通量                                                       |
| $\hat{v}_a$         | リンク $a(\in \hat{A}_r)$ の目標交通量                                             |
| $w_s$               | ルートセクション $s$ の交通量                                                         |
| $w_{s, 0}$          | ルートセクション $s$ の運賃値下げ前の交通量                                                  |
| $Z$                 | 政府負担総額                                                                    |
| $b_g$               | 自治体 $g$ 内の駅を出発地とする人の便益の総和                                                 |

### 3.2 交通量配分問題

オリジナルネットワーク $G(N, A)$ で移動する人の行動を考える。鉄道の乗継行動やサービスの待ち時間を明示的に考慮できるように、オリジナルネットワークは、リンクの代わりにルートセクションを用いた拡張ネットワーク $\hat{G}(N, S)$ に変換する。ここでルートセクションとは、鉄道などを用いて乗り換えをせずに移動できる2つのノード間を結ぶ新たなリンクを表す。ルートセクションの組み合わせによりルートを作成する。

公共交通の場合、各ルートセクションには、そのルートセクションの移動に使われる路線があり、使われうる

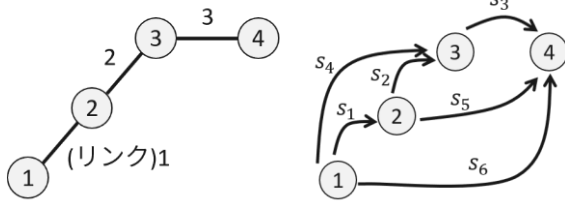


図-1 オリジナルネットワークと拡張ネットワーク

路線をそのルートセクションのコモンラインと呼ぶ。ルートセクション $s$ のコモンラインの集合を $C_s$ とする。コモンラインの定式化は、Uchida et al.<sup>5)</sup>に基づく。

以下では、ルートセクションの期待所要時間 $\hat{t}_s$ と、期待運賃 $\hat{p}_s$ について定式化する。

$$\hat{t}_s = \frac{1 + \sum_{l \in C_s} \sum_{a \in A} f_l t_a^l \phi_s^a}{\sum_{l \in C_s} f_l} \quad (1)$$

式(1)の分子の第1項は、期待待ち時間に対応し、第2項は期待乗車時間に対応する。同様に、ルートセクション $s$ を移動する際の期待運賃は式(2)で表される。

$$\hat{p}_s = \frac{\sum_{l \in C_s} \sum_{a \in A} f_l \hat{p}_a^l \phi_s^a}{\sum_{l \in C_s} f_l} \quad (2)$$

where

$$\hat{p}_a^l = \begin{cases} p_a^l & \forall a \in A \setminus \hat{A}_r \\ p_a^l(1 - \omega_a), & 0 \leq \omega_a \leq 1 \quad \forall a \in \hat{A}_r \end{cases} \quad (3)$$

ここで $\omega_a$ は、路線 $l$ が通過するリンク $a$ ( $\in \hat{A}_r$ )の運賃を割り引く変数である。ルートセクション $s$ における利用者の効用を式(4)で定義する。

$$u_s = -\alpha_1 \hat{t}_s - \alpha_2 \hat{p}_s - \alpha_3 \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ はパラメータである。

OD ペア $\pi$ 間のルート $k$ の効用 $U_\pi^k$ を式(5)で定義する。

$$U_\pi^k = \hat{u}_\pi^k + \varepsilon_\pi^k \quad (5)$$

where

$$\hat{u}_\pi^k = \sum_{s \in S} u_s \delta_{\pi,k}^s \quad (6)$$

ここで $\varepsilon_\pi^k$ はルート $k$ ( $\in K_\pi$ )の効用に対する誤差項であり、その分布関数は式(7)で表される。

$$f(\varepsilon_\pi^k) = \exp \left( - \sum_{n \in \{1,2\}} \left( \sum_{k \in K_\pi} \exp \left( - \frac{\varepsilon_\pi^k}{\theta_n} \right)^{\theta_n} \right) \right) \quad (7)$$

OD ペア $\pi$ 間のルート $k$ の交通量は Nested Logit Model により、式(8)で与えられる。

$$q_\pi^k = P(k, m)_\pi \cdot \bar{q}_\pi \quad (8)$$

where

$$P(k, m)_\pi = P(m)_\pi \cdot P(k|m)_\pi \quad (9)$$

$$P(m)_\pi = \frac{1}{1 + \exp(\theta_2(\bar{u}_\pi - S_\pi))} \quad (10)$$

$$P(k|m)_\pi = \frac{\exp(\theta_1 \hat{u}_\pi^k)}{\sum_{k \in K_\pi} \exp(\theta_1 \hat{u}_\pi^k)} \quad (11)$$

$$S_\pi = \frac{1}{\theta_1} \ln \sum_{k \in K_\pi} \exp(\theta_1 \hat{u}_\pi^k) \quad (12)$$

$\bar{u}_\pi$ は OD ペア $\pi$ 間の移動しないときの効用であり、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ は $\theta_2 > \theta_1 > 0$ となるパラメータである。

ルートセクション $s$ とリンク $a$ の交通量はそれぞれ式

(13)、式(14)で与えられる。

$$w_s = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{k \in K_\pi} q_\pi^k \delta_{\pi,k}^s \quad (13)$$

$$v_a = \sum_{s \in S} w_s \phi_s^a \quad (14)$$

上記の Nested Logit Model と等価な最適化問題は、式(15)-(18)で与えられ、式(9)-(12)に示した関係は、最適化問題の一次の最適性条件から得られる。

$$\begin{aligned} \min & \left[ - \sum_{s \in S} u_s w_s - \sum_{\pi \in \Pi} \bar{u}_\pi \bar{q}_\pi \right. \\ & + \frac{1}{\theta_1} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{k \in K_\pi} q_\pi^k \ln \left( \frac{q_\pi^k}{\bar{q}_\pi} \right) \\ & \left. + \frac{1}{\theta_2} \sum_{\pi \in \Pi} \left( q_\pi \ln \left( \frac{q_\pi}{\bar{q}_\pi} \right) + \bar{q}_\pi \ln \left( \frac{\bar{q}_\pi}{q_\pi} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

subject to

$$q_\pi + \bar{q}_\pi = \bar{q}_\pi \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K_\pi} q_\pi^k = q_\pi \quad (17)$$

$$q_\pi \geq 0, \bar{q}_\pi \geq 0, q_\pi^k \geq 0 \quad (18)$$

### 3.3 ネットワークデザイン問題

廃止検討リンク $a$ ( $\in \hat{A}_r$ )について考える。このようなリンクにおいては、採算性を確保するための最小交通量 $\hat{v}_a$ が設定されていると想定できる。廃止検討リンクの運賃を値下げし、交通量を $\hat{v}_a$ に近づける政策を考える。 $\omega_a$ の制御により各リンクでの交通量が増加し、最小交通量が実現できる場合、そのリンクは運賃補助リンクとして維持される。一方、運賃を0とした場合でも最小交通量が実現されないリンクが存在する路線については、廃止する。

廃止検討リンクにおける運賃変更に関する問題は以下のように定式化される。

$$\min \sum_{a \in \hat{A}_r} (v_a(\omega) - \hat{v}_a)^2 \quad (19)$$

w.r.t.  $\omega_a \quad \forall a \in \hat{A}_r$

subject to (15) – (18),  $v_a \leq \hat{v}_a \quad \forall a \in \hat{A}_r$

式(19)を解いた結果、目標交通量を満たすリンクは運賃補助リンクとして維持される。目標交通量に満たないリンクは廃止され、そのリンクを $\hat{A}_r$ から除いて式(19)を再計算する。目標交通量に満たないリンクが無くなるまで再計算を繰り返す。

### 3.4 政府負担額

式(19)により決定した運賃補助リンクと、維持確定リンクによって形成される線路ネットワークについて考える。ある運賃補助リンク $a$ ( $\in \hat{A}_r$ )に対して補助を行うと、維持確定リンク $a$ ( $\in A_r \setminus \hat{A}_r$ )にも、乗客増加の波及効果が出る。この波及効果を政府が回収することとする。政府負担総額 $Z$ は式(19)で計算された変数の値を使用して、式(20)で表せる。

$$Z = \sum_{s \in S} (p_s - \hat{p}_s) w_s - \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_r \setminus \hat{A}_r} \frac{\sum_{l \in C_s} f_l p_l^a}{\sum_{l \in C_s} f_l} \phi_s^a (w_s - w_{s,o}) \quad (20)$$

where

$$p_s = \frac{\sum_{l \in C_s} \sum_{a \in A_r} f_l p_l^a \phi_s^a}{\sum_{l \in C_s} f_l} \quad (21)$$

式(21)は運賃値下げ前のルートセクション $s$ の期待運賃、式(20)の第1項は運賃補助リンクへの運賃補助の総額、第2項は維持確定リンクへの波及効果分を表している。

次に、費用を負担する政府がいくつかの自治体から構成される場合、それぞれの自治体の費用負担について考える。ある自治体 $g$ 内の駅を起点とする OD ペアの集合を $\Pi_g$ と表す。その自治体を出発地とするトリップを考えると、運賃値下げによる期待最小費用の減少分、すなわち利用者便益は式(22)で表すことができる。

$$b_g = \sum_{\pi \in \Pi_g} \frac{\bar{q}_\pi}{\alpha_2 \theta_2} [\ln(\exp(\theta_2 S_{\pi,w}) + \exp(\theta_2 \tilde{u}_\pi)) - \ln(\exp(\theta_2 S_{\pi,o}) + \exp(\theta_2 \tilde{u}_\pi))] \quad (22)$$

ここで $S_{\pi,o}$ 、 $S_{\pi,w}$ は、それぞれ式(12)から計算される値下げ前後の期待最大効用である。式(22)は自治体 $g$ 内の駅を出発地とする人の便益の上昇量の総和であり、これを自治体 $g$ の最大負担額とする。すなわち、自治体内の駅を出発地とする利用者が運賃値下げにより得る便益の相当額をその自治体負担する最大値と考える。実際には、式(20)で議論した波及効果が存在する限り、 $\sum_g b_g > Z$ なる関係が成立（証明は自明なので省略）するため、自治体の負担額は式(22)よりも小さくなる。また、このことは本研究で示したスキームに従う限り、運賃値下げによる便益は必ず費用よりも大きくなることも示している。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、ネットワーク規模での影響を鑑みた上で、廃止検討リンクに対する運賃変更によって、廃止リンクを決定し、政府が運賃を補助する総額を最小化するスキームを定式化した。

今後は本研究で提案するスキームの妥当性を検証するため、テストネットワークにおける数値計算を実施する。モデル自体の深化としては、複数の地方自治体が費用負担者となる場合の費用負担配分方法の検討、あるいはより現実的なモデルを目指して、運賃の非加法性を導入することなどを行いたい。

#### 5. 参考文献

1. JR 北海道: 当社単独では維持することが困難な線区について,  
<https://www.jrhokkaido.co.jp/pdf/161215-5.pdf> (閲覧日 2020.12.14)
2. 山崎剛志: 交通モード選択モデルにおける最適補助金, 新潟大学経済論集, No.84, pp.85-104, 2008.
3. Nils Fearnley, Jon-Terje Bekken, & Bard Norheim: Optimal performance-based subsidies in Norwegian intercity rail transport, *International Journal of Transport Management*, No.2, pp.29-38, 2004.
4. 国土交通省: 費用分析における将来交通需要推計手法の改善について,  
<https://www.mlit.go.jp/common/000130319.pdf> (閲覧日 2020.12.14)
5. Kenetsu Uchida, Agachai Sumalee, David Watling, & Richard Connors: Study on Optimal Frequency Design Problem for Multimodal Network Using Probit-Based User Equilibrium Assignment, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1923, pp.236-245, 2005.