

財政制約下における線区の廃止を考慮した 鉄道ネットワークに対する最適運賃補助施策

佐藤 佑樹¹・峪 龍一²・内田 賢悦³

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: yuki-sugar@eis.hokudai.ac.jp

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

³正会員 北海道大学大学院教授 工学研究院（〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8）
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

2016 年に JR 北海道が単独で維持することが困難な線区を公表して以降、該当の線区では線区の今後について議論が進んでいる。本研究では、廃止が検討されている線区の維持のため、政府が鉄道利用者への運賃の補助を行い、線区の利用を促す政策を考える。政府は財政制約を持ち、運賃の補助による利用者の増加が不十分な場合には線区を廃止することを考慮に入れた上で、区間に対する補助率と廃止する区間を決定する。財政制約によりファーストベストの最適解が実行不可能な場合は、財政制約内のセカンドベストの解を導出する。利用者はマルチモーダルネットワーク上で効用を最大化するように経路を選択して行動する。また、このモデルのパラメータの推計を、2015 年に実施された第 6 回全国幹線旅客純流動調査を基に、北海道地域に対して行った。

Key Words: fare subsidy, multi-modal network, nested logit model, network design problem

1. はじめに

(1) 背景

鉄道には様々な役割が存在する。その役割は、旅客輸送、貨物輸送に加え、冬季・国防・災害時等の非常時の輸送、地域のイメージ戦略等に分類できる。

この内、旅客輸送について、JR 北海道は 2016 年に「当社単独では維持することが困難な線区について」¹を公表し、石北線などの特急列車が運行され、地域間の輸送を担う線区であっても、JR 北海道が単独では維持が困難であるとした。これを受けて北海道は、2018 年に北海道交通政策総合指針²を策定し、中核都市間等を結ぶ交通は、「鉄道や航空機、都市間バスといった高速な移動手段により、相互に補完しながら強靱なネットワークを形成」するという方向性を定めた。

また、2020 年以降の COVID-19 の流行による交通事業者の収益悪化を受けて、国土交通省は「鉄道事業者と地域の協働による地域モビリティの刷新に関する検討会」を開催し、2022 年に「地域の将来と利用者の視点に立ったローカル鉄道の在り方に関する提言」³をまとめた。提言では、地域ごとの特性に応じて、利用者の少ない線区の公共交通を見直すべきとしている。

このような動きから、今後は鉄道の必要性を複数の交

通モードを考慮した交通ネットワーク全体として判断し、旅客需要が少なく収支が合わない線区においては、線区の廃止も選択肢の一つとして交通ネットワークをデザインしていくことになるだろう。一方で、航空機に対する環境優位性や、自動車の交通量削減など、利用者が交通モードの選択時に考慮しない鉄道の外部効果が存在する。これらの外部効果や、旅客輸送以外の鉄道の役割を含めずに交通ネットワークをデザインしてしまうと、社会全体としての利益を損なってしまう。

このことを考慮して交通ネットワークをデザインする最も単純な方法として、鉄道の運営会社に対して補助金を交付し、鉄道会社と社会全体の利益のずれを調整するという方法が挙げられる。補助を実施しても、線区の旅客輸送による収入が、その線区の旅客需要によって負担されるべき維持費用を超えない場合、線区は廃止されるのが経済的厚生観点から妥当である。

しかし、補助金を負担することになる自治体や政府は厳しい財政制約下にある。そのため、補助金を交付するスキームを設計する際には、財政制約が考慮されており、補助による受益者が明確化されていることが望ましい。

(2) 先行研究

ネットワークの構造の決定を含めた都市間交通ネット

ワークの最適化を行う先行研究の例として、細・奥村⁴⁾は、集計モデルを利用して交通量を計算し、消費者余剰を最大化する航空・鉄道・バスのリンクの組み合わせを計画するモデルを提案している。テストネットワークによる試算において、交通のサービスレベルの上下による需要の変化により、最適なネットワークの構造が変わることを示している。

鉄道の費用負担について検討している研究として、吉田・奥村⁵⁾は、集計モデルを利用し、鉄道の固定費用の費用負担スキームを複数比較し、それぞれの場合のネットワークの最適な構造と消費者余剰の変化について考察している。その中で、費用の一部を政府が別途税金により徴収した財源から負担することで、負担しない場合に比べて効率的なネットワークが形成される可能性を示している。

以上の先行研究では、線形の需要関数を仮定しており、利用者の経路選択行動はモデルで考慮されていない。しかし、運賃補助による利用者の行動への影響を解析し、受益者を明らかにするためには、経路選択行動を解析する必要がある。

経路選択行動を含めた研究として、著者ら⁶⁾は、経路選択行動を *Nested Logit Model* で明示し、政府が財政制約下において運賃補助を行うモデルを開発している。運賃補助は、廃止される可能性がある線区に対して、利用者がその線区を利用する際の運賃を割引くことで表現される。運賃補助をしても十分な交通量に満たない線区は廃止された上で、政府の運賃補助の費用を最小化するように補助率の組み合わせを決定している。

財政制約を考慮しなかった場合の最適解(ファーストベスト)が、財政制約により実行可能領域から外れた場合、財政制約を満たしている次善の解(セカンドベスト)が採用されるべきである。しかし、著者ら⁶⁾では、必ずしも次善の解を導出できるようなスキームにはなっておらず、本研究では、次善の解を導出可能なスキームを開発する。

(3) 本研究の目的

本研究では、利用者が少なく廃止が検討されている鉄道の線区に対して政府が運賃の補助を行うことで、廃止を回避するスキームにおいて、最適な運賃補助額とネットワークの構造を導出することを目的とする。政府は財政制約下で、運賃補助による純便益を最大化するように、線区に対する補助率と廃止する線区の組み合わせを決定する。利用者の行動は *Nested Logit Model* により記述され、効用を最大化するように行動する。

以上により、交通ネットワーク全体として発生する、鉄道の線区を廃止する際の不便益と、維持する際の費用及び運賃補助による便益を考慮して、最適なネットワー

ク構造を決定することが可能である。

2. モデルの構成

著者ら⁶⁾の研究における、ネットワークと利用者の行動の表現、運賃補助に関するいくつかの変数の定式化を参考に、ネットワーク形状の変更を表現できる定式化を行う。

(1) ネットワークの表現

都市を表すノード $n(\in N)$ 、それらを接続する交通モード $m(\in M)$ のリンク $a(\in A_m)$ 、全てのモードのリンクの集合 $A(= \cup_{m \in M} A_m)$ を用いて、現在使用されているマルチモーダルネットワークを物理ネットワーク $G(N, A)$ と表現する。このグラフ上で系統 $l(\in L)$ の運行が定義される。

交通ネットワークの利用者の経路選択行動を明示的に考慮するために、仮想ネットワーク $\hat{G}(N, S)$ を導入する。 \hat{G} は、系統 $l(\in L)$ から作成したルートセクション $s(\in S)$ を仮想リンクとして持つネットワークである。ルートセクションは系統を乗換せずに移動可能な 2 ノードを結ぶリンクであり、ルートセクションの組み合わせとして経路を表現することで、系統の利用や交通機関のサービスの待ち時間を明示的に考慮できる。ルートセクション s で利用可能な系統であるコモンラインの集合を L_s で表す。コモンラインは Uchida et al.⁷⁾ に基づいて、列車の車頭時間が指数分布に従い、乗客が駅に到着するタイミングの分布が一樣分布に従うと仮定し、求める。

ルートセクション s における期待移動時間 \hat{t}_s は、以下のように定式化される。

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

ここで、 f_l は系統 l のサービス頻度、 t_l^a は系統 l を利用してリンク a を移動する際の乗車時間である。 ϕ_s^a はルートセクション s がリンク $a(\in A)$ 上を通過すれば 1、そうでなければ 0 をとる変数である。自家用車のルートセクションはサービス頻度を無限大とすることにより、一般性を失わずに表現できる。

(2) 運賃補助の定式化

リンクは、運賃の補助を実施する廃止検討リンク(集合: \hat{A}_r) と、運賃補助を実施しない維持確定リンクに分類される。廃止検討リンク $a(\in \hat{A}_r)$ には、リンクごとに異なる補助率 ω_a が設定され、そのリンクを通る利用者は政府により運賃が補助され、安い運賃で移動できる。維持確定リンクに運賃補助は実施されない。

本研究では運賃の線形性を仮定する。運賃の線形性と

は、各リンクのみを利用するときの運賃を加算することで、複数のリンクを使用する際の運賃を計算することを意味し、実際の鉄道の運賃の計算方法である遠距離通減などは考慮できない。このとき、ルートセクション s を移動する際の期待運賃 \hat{p}_s は、補助率ベクトル $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_{|\hat{A}_r|})$ の関数となり、式(2)で表される。

$$\hat{p}_s(\omega) = \sum_{a \in A} \hat{p}_s^a(\omega_a) \phi_s^a \quad (2)$$

where

$$\hat{p}_s^a(\omega_a) = \frac{\sum_{l \in L_s} f_l \hat{p}_l^a(\omega_a)}{\sum_{l \in L_s} f_l} \quad (3)$$

$$\hat{p}_l^a(\omega_a) = \begin{cases} p_l^a(1 - \omega_a), & 0 \leq \omega_a \leq 1 & \forall a \in \hat{A}_r \\ p_l^a & \forall a \in A \setminus \hat{A}_r \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 p_l^a は系統 l を利用してリンク a を移動する際の運賃補助前の運賃であり、鉄道会社に支払われる運賃である。式(3)は、運賃補助を受けた状態でルートセクション s を移動する利用者がリンク a に対し支払う期待運賃を意味する。式(4)は、運賃補助を受けた状態で系統 l を利用してリンク a を移動する際に利用者が支払う運賃の定義である。

(3) 利用者の行動

OD ペア nn' を移動する交通ネットワークの利用者は、式(5)で定義される効用を最大化する選択肢 $i (i \in I_{nn'})$ を選び、行動する。選択肢集合 $I_{nn'}$ は図-1に示すように、移動しないか($i = 0$)、移動する際は経路($i = k, k \in K_{nn'}$)が選択肢となる。 $K_{nn'}$ はODペア nn' の利用可能な経路集合である。

$$U_{nn'}^i = \hat{u}_{nn'}^i(\omega) + \varepsilon_{nn'}^i \quad \forall i \in I_{nn'}, \forall n, n' \in N \quad (5)$$

where

$$\hat{u}_{nn'}^i(\omega) = \begin{cases} u_{nn'}^0 & i = 0 \\ \hat{u}_{nn'}^k(\omega) & i = k, \forall k \in K_{nn'} \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{u}_{nn'}^k(\omega) = -\alpha_1 \sum_{s \in S} \hat{t}_s \delta_{nn',k}^s - \alpha_2 \sum_{s \in S} \hat{p}_s(\omega) \delta_{nn',k}^s - \sum_{m \in M} \alpha_3^m \xi_{nn',k}^m \quad (7)$$

$\hat{u}_{nn'}^i, \varepsilon_{nn'}^i$ はそれぞれ、選択肢 i の効用の確定項と誤差項である。 $u_{nn'}^0$ は移動しないときの効用の確定項であり、定数である。 $\delta_{nn',k}^s$ は経路 k が、ルートセクション s を含めば1、そうでなければ0をとる変数、 $\xi_{nn',k}^m$ は経路 k が、モード m を含めば1、そうでなければ0をとる変数である。 α_1, α_2 はモードによらないパラメータであり、 α_3^m はモードにより値の異なるパラメータである。

OD ペア nn' の選択肢 i の交通量 $q_{nn'}^i(\omega)$ は、Nested Logit Model により与える。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > 0$ をとるパラメータであり、ODペア nn' の自家用車の期待最大効用 $u_{nn'}^{*1,pc}$ と公共交通の期待最大効用 $u_{nn'}^{*1,pt}$ 、移動する期

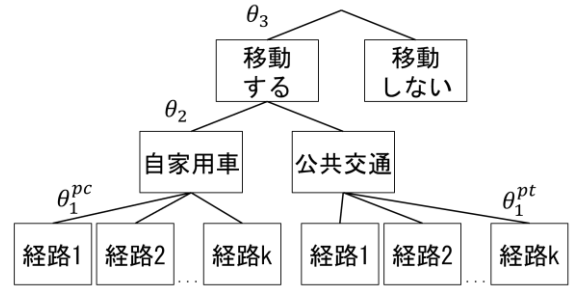


図-1 交通ネットワークの利用者の選択肢

待最大効用 $u_{nn'}^{*2}$ は、それぞれ式(8)から式(10)で表される。

$$u_{nn'}^{*1,pc}(\omega) = \frac{1}{\theta_1^{pc}} \ln \sum_{k \in K_{nn'}^{pc}} \exp(\theta_1^{pc} u_{nn'}^k(\omega)) \quad (8)$$

$$u_{nn'}^{*1,pt}(\omega) = \frac{1}{\theta_1^{pt}} \ln \sum_{k \in K_{nn'}^{pt}} \exp(\theta_1^{pt} u_{nn'}^k(\omega)) \quad (9)$$

$$u_{nn'}^{*2}(\omega) = \frac{1}{\theta_2} \ln \left[\exp(\theta_2 u_{nn'}^{*1,pc}(\omega)) + \exp(\theta_2 u_{nn'}^{*1,pt}(\omega)) \right] \quad (10)$$

ここで、 $K_{nn'}^{pc} (\subset K_{nn'})$ と $K_{nn'}^{pt} (\subset K_{nn'})$ はそれぞれ、OD ペア nn' における自家用車と公共交通の利用可能な経路集合である。

OD ペア nn' の選択肢 i の交通量 $q_{nn'}^i$ は、OD ペア nn' の総交通需要を $\bar{q}_{nn'}$ として、以下のように表される。

$$q_{nn'}^{*2}(\omega) = \bar{q}_{nn'} \frac{\exp(\theta_3 u_{nn'}^{*2}(\omega))}{\exp(\theta_3 u_{nn'}^{*2}(\omega)) + \exp(\theta_3 u_{nn'}^0)} \quad \dots \quad (11)$$

$$q_{nn'}^0(\omega) = \bar{q}_{nn'} - q_{nn'}^{*2}(\omega) \quad (12)$$

$$q_{nn'}^{*1,pc}(\omega) = q_{nn'}^{*2}(\omega) \frac{\exp(\theta_2 u_{nn'}^{*1,pc}(\omega))}{\exp(\theta_2 u_{nn'}^{*1,pc}(\omega)) + \exp(\theta_2 u_{nn'}^{*1,pt}(\omega))} \quad \dots \quad (13)$$

$$q_{nn'}^{*1,pt}(\omega) = q_{nn'}^{*2}(\omega) - q_{nn'}^{*1,pc}(\omega) \quad (14)$$

$$q_{nn'}^k(\omega) = q_{nn'}^{*1,\mu}(\omega) \frac{\exp(\theta_1^\mu u_{nn'}^k(\omega))}{\exp(\theta_1^\mu u_{nn'}^k(\omega)) + \exp(\theta_1^\mu u_{nn'}^k(\omega))} \quad \forall k \in K_{nn'}^\mu, \mu \in \{pc, pt\} \quad \dots \quad (15)$$

ここで、式(11)と式(12)はそれぞれ、ODペア nn' において交通ネットワーク上を移動する需要量であり、式(13)と式(14)はそれぞれ、自家用車と公共交通を利用する需要量である。式(15)は経路 k を利用して移動する需要量である。

ルートセクション s とリンク a の交通量はそれぞれ式(16)、式(17)で与えられる。

$$w_s(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{nn'} \sum_{k \in K_{nn'}} q_{nn'}^k(\boldsymbol{\omega}) \delta_{nn',k}^s \quad (16)$$

$$v_a(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{s \in S} w_s(\boldsymbol{\omega}) \phi_s^a \quad (17)$$

(4) 鉄道会社の行動

鉄道会社は廃止検討リンクのうち、運賃補助後でもリンクの収支が赤字の線区を廃止する。これを維持条件として式(18)で定式化する。

$$R_a(\boldsymbol{\omega}) \geq \bar{C}_a, \forall a \in \hat{A}_r \quad (18)$$

where

$$R_a(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{s \in S} \hat{p}_s^a(0) w_s(\boldsymbol{\omega}) \phi_s^a \quad (19)$$

ここで、 R_a と \bar{C}_a はそれぞれリンク a の収入と維持費用を表し、 \bar{C}_a は定数である。

鉄道会社はリンクの廃止後も、廃止されていないリンク上でシステムの運行を続け、システムの所要時間やサービス頻度、運賃は変化しないものとする。

(5) 政府の行動

政府は、廃止検討リンクに対して補助率 $\boldsymbol{\omega}$ で運賃補助を行う。 x_a は、廃止検討リンク $a(a \in \hat{A}_r)$ に対して政府が運賃補助を行うことでリンク維持する場合に1をとり、運賃補助を行わず鉄道会社による廃止を黙認する場合は0をとる変数と定義する。

運賃補助により、維持確定リンクにおいて乗客が増加する波及効果が発生する。本研究では、政府の負担を軽減し、財政制約下で廃止検討リンクに対して多くの運賃補助を実施するため、この波及効果分の運賃収入を政府が回収することとする。この時、交通ネットワークに対し行われる運賃補助により、政府が負担する補助費用 $GE(\boldsymbol{\omega})$ は、式(20)で表される。

$$GE(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{s \in S} (\hat{p}_s(0) - \hat{p}_s(\boldsymbol{\omega})) w_s(\boldsymbol{\omega}) - \sum_{s \in S} \sum_{a \in \hat{A}_r \setminus \hat{A}_r} \hat{p}_s^a(0) \phi_s^a (w_s(\boldsymbol{\omega}) - w_s(0)) \quad (20)$$

$\hat{p}_s(0), w_s(0)$ はそれぞれ、すべての廃止検討リンクでの補助率が0である、すなわち運賃補助がない場合におけるルートセクションの利用者が支払う運賃と利用者数を表す。式(20)の第一項は政府が行う運賃補助の総額、第二項は波及効果分の運賃収入である。

次に、交通事業者の収支を考える。運賃補助により利用者の経路選択が変化し、交通事業者の運賃の収入が変化する。また、廃止検討リンクの廃止により維持費用が不要になる効果を考慮するため、廃止検討リンクの維持費用を交通事業者の費用として計上する。よって、運賃補助による、交通ネットワークで交通サービスを供給する全事業者の収支の変化の和 $PD(\boldsymbol{\omega})$ は、式(21)で表され

る。

$$PD(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x}) = \sum_{s \in S} \hat{p}_s(0) w_s(0) - \sum_{a \in \hat{A}_r} \bar{C}_a \cdot x_a \quad (21)$$

式(21)の第一項は交通事業者の収入、第二項は廃止検討リンクの維持費用である。

運賃補助により、交通ネットワークの利用者が得る便益の金銭価値 $UB(\boldsymbol{\omega})$ は、式(22)で表される。

$$UB(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{n \in N} [UB_n(\boldsymbol{\omega}) - UB_n(0)] \quad (22)$$

where

$$UB_n(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{n' \in N} \frac{\bar{q}_{nn'}}{\alpha_2 \theta_3} \ln[\exp(\theta_3 u_{nn'}^{*2}(\boldsymbol{\omega})) + \exp(\theta_3 u_{nn'}^0)] \quad (23)$$

ここで $UB_n(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x})$ は、運賃の補助率が $\boldsymbol{\omega}$ でリンクの廃止状況が \boldsymbol{x} の場合の、ノード n を出発するトリップの期待最大効用を表す。

式(20)から式(23)より、運賃補助による社会全体の純便益 $NB(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x})$ は式(24)で表される。

$$NB(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x}) = UB(\boldsymbol{\omega}) + PD(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x}) - GE(\boldsymbol{\omega}) \quad (24)$$

政府には財政制約が存在し、式(25)で定式化する。

$$GE(\boldsymbol{\omega}) \leq \bar{GE} \quad (25)$$

ここで、 \bar{GE} は政府が負担する補助費用の最大値であり、定数である。

以上の定式化を用いて、政府の財政制約下における純便益を最大化するネットワークデザイン問題(NDP)は以下のように定式化される。

$$\max NB(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x}) \quad (26)$$

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

$$\text{s.t. } \text{式(18), (25)}$$

$$x_a \in \{0, 1\} \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (27)$$

$$\begin{cases} \omega_a = 0 & \text{if } x_a = 0 \\ 0 \leq \omega_a \leq 1 & \text{if } x_a = 1 \end{cases} \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (28)$$

$$\begin{cases} v_a(\boldsymbol{\omega}) = 0 & \text{if } x_a = 0 \\ v_a(\boldsymbol{\omega}) \geq 0 & \text{if } x_a = 1 \end{cases} \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (29)$$

この問題は決定変数の x_a が二値変数であり、 x_a の数が多い場合、現実的な時間で解けない可能性がある。そのため、 x_a を連続変数に緩和した以下の問題を解く。

$$\max NB(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{x}) \quad (30)$$

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

$$\text{s.t. } \text{式(18), (25)}$$

$$0 \leq x_a \leq 1 \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (31)$$

$$(1 - x_a) \cdot \omega_a = 0, 0 \leq \omega_a \leq 1 \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (32)$$

$$(1 - x_a) + \omega_a - \sqrt{(1 - x_a)^2 + \omega_a^2} < \psi_\omega \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (33)$$

$$(1 - x_a) \cdot v_a(\boldsymbol{\omega}) = 0, v_a(\boldsymbol{\omega}) \geq 0 \quad \forall a \in \hat{A}_r \quad (34)$$

$$(1 - x_a) + v_a(\boldsymbol{\omega}) - \sqrt{(1 - x_a)^2 + v_a(\boldsymbol{\omega})^2} < \psi_v \quad \forall a \in \hat{A}_r \cdots \quad (35)$$

ここで、 ψ_ω, ψ_v は非常に小さい正の実数である。

3. 実ネットワークによるパラメータの推計

2015 年に実施された第 6 回全国幹線旅客純流動調査⁸⁾ (以下、純流動調査)を用いて、北海道地域を対象としたパラメータの推計を行った。飛行機、鉄道、バスの所要時間、サービス頻度、運賃には、2015 年 10 月の JTB 時刻表⁹⁾を用いた。自家用車の所要時間と運賃は、純流動調査に付随していた OD 別交通サービス水準の所要時間と費用を用いた。推計に用いた仮定、定式化、及び推計の結果を記す。

(1) 純流動調査の特徴と仮定

純流動調査において、北海道は道北、道東、道央、道南の 4 県の集合として扱われており、さらに各県はいくつかの生活圏に細分化され、北海道内には全部で 20 の生活圏が設定されている。本研究では、生活圏を 1 つのノードに代表させる。また、純流動調査は生活圏間の移動のうち、県を超える移動を対象に調査しているため、北海道内の移動では 137 の OD ペアの交通量が計上されている。この OD ペアのデータを利用してパラメータの推計を行うため、主に地域間移動を反映したパラメータとなる。

純流動調査の交通量は OD ペアごとに自家用車、航空、旅客船、鉄道、バスに分かれて計上されており、北海道内の移動に船舶の利用者はいなかった。そのため、公共交通の経路は航空、鉄道、バスのみから構成する。自家用車と公共交通を同時に使用する経路は使われないと仮定する。

複数の交通モードを利用して目的地に到達した場合、純流動調査では、既定の優先順位に基づいて代表交通機関を判定し、その代表交通機関のみにトリップを計上している。これに合わせてモードの利用者数をモデルで計算するため、利用者の選択肢を図-2 のように変更する。また、経路別の交通量は不明のため、1 つの OD ペアにおいて交通量を負荷する経路は各交通機関につき 1 つとする。すなわち、 $\theta_0, \theta_1^{pc} = 10^5$ とする。

モデルの簡単化のため、出発地からノードまでとノードから目的地までのアクセス・イグレス交通は無視する。

鉄道のネットワークにおいて、ノードは各生活圏の代表駅を表し、代表駅は、その生活圏内の市町村の中で最も人口の多い市町村にある鉄道駅とする。ノードと代表駅の関係は表-1 に示す。

鉄道の物理ネットワークは図-3 に示す。モデル内で考慮する系統は、特急が運行されているリンクでは特急のみ、特急が運行されていないリンクでは快速・普通列車とする。

純流動調査のデータの構造上、1 つの生活圏に複数のノードを定義したり、同じ組み合わせのノード間に複数

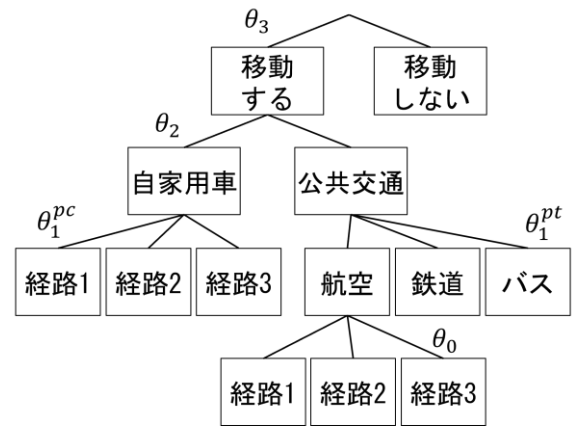


図-2 実データによるパラメータ推定で使用する交通ネットワークの利用者の選択肢

表-1 生活圏と代表駅

ノード	県	生活圏	代表駅
1	道北	旭川	旭川駅
2	道北	北網走	北見駅
3	道北	稚内	稚内駅
4	道北	留萌	留萌駅
5	道北	紋別	遠軽駅
6	道北	名士	名寄駅
7	道北	富良野	富良野駅
8	道東	釧路	釧路駅
9	道東	帯広	帯広駅
10	道東	根室	根室駅
11	道央	札幌	札幌駅
12	道央	苫小牧	苫小牧駅
13	道央	小樽・俱知安	小樽駅
14	道央	室蘭	東室蘭駅
15	道央	岩見沢	岩見沢駅
16	道央	滝川	滝川駅
17	道央	深川	深川駅
18	道央	静内	静内駅
19	道南	函館	函館駅
20	道南	江差	-

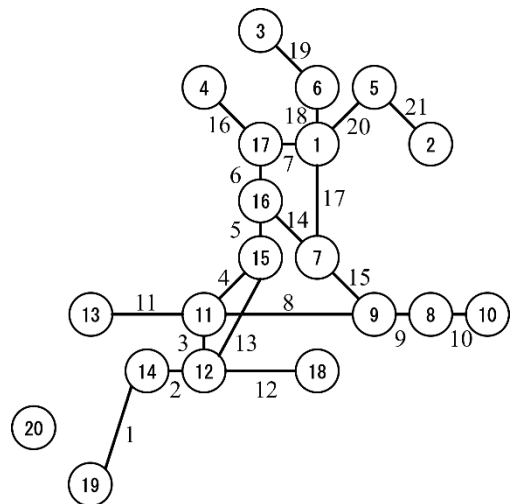


図-3 鉄道ネットワークのノードとリンク

のリンクを定義したりすることが困難である。そのため、本来であればシステムが運行され、利用者がいる区間でも、モデル内で利用者を考慮できない区間が存在する。これに該当するのは、釧網線にあたるノード 2 と 8 を結ぶ区間、函館本線の一部であるノード 13 と 19 を結ぶ区間、札幌線にあたるノード 11 と 15、15 と 16 を結ぶ区間である。

(2) パラメータ推計の定式化

公共交通の選択肢構造の変更を反映し、航空、鉄道、バスが代表交通機関の交通量をそれぞれ $q_{nn'}^{*0,air}$, $q_{nn'}^{*0,rail}$, $q_{nn'}^{*0,bus}$ で表し、式(36)のように定式化される。

$$q_{nn'}^{*0,\mu}(\omega) = q_{nn'}^{*1,pt}(\omega) \frac{\exp(\theta_1^{pt} u_{nn'}^{*0,\mu}(\omega))}{\sum_v \exp(\theta_1^{pt} u_{nn'}^{*0,v}(\omega))} \quad (36)$$

$$u_{nn'}^{*0,\mu}(\omega) = \frac{1}{\theta_0} \ln \sum_{k \in K_{nn'}^{pt,\mu}} \exp(\theta_0 u_{nn'}^k(\omega)) \quad (37)$$

$\forall \mu \in \{air, rail, bus\}$

パラメータの推計は、OD ペア毎の代表交通機関別の交通量における、実データの値とモデルによる計算値の差が最小となるように行い、式(38)、(39)で定式化する。

$$\begin{aligned} (\alpha, \theta, \mathbf{u}^0) = & \arg \min_{\alpha, \theta, \mathbf{u}^0} \sum_{nn'} \left(\sum_{\mu} (q_{nn'}^{*0,\mu}(\mathbf{0}) - \hat{q}_{nn'}^{*0,\mu})^2 \right. \\ & \left. + (q_{nn'}^{*1,pc}(\mathbf{0}) - \hat{q}_{nn'}^{*1,pc})^2 \right) \quad (38) \\ & \forall \mu \in \{air, rail, bus\} \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } \alpha_3^{rail} = 0, \theta_1^{pt} = 1 \quad (39)$$

ここで、 $q_{nn'}^{*0,\mu}$ は OD ペア nn' で代表交通機関が μ の実データにおける交通量、 $\hat{q}_{nn'}^{*1,pc}$ は、代表交通機関が自家用車の実データにおける交通量である。式(38)の第一項は公共交通が代表交通機関である経路の交通量の実データの値とモデルにより推定される値の差の二乗値であり、第二項は自家用車におけるそれである。

(3) 推計結果

本節では、パラメータの推計結果を示す。 \mathbf{u}^0 は 137 個存在するため、 α と θ の推計結果のみを表-2 に示す。選択接近法による時間価値 α_1/α_2 は 29.8 円/分である。図-4 に、推計されたパラメータを使ってモデルにより算出されたモードの交通量と、実データの値の比較を示す。

表-2 パラメータ推計結果

パラメータ	推計値
α_1	2.6509
α_2	-0.0089
α_3^{air}	-758.9
α_3^{bus}	-720.9
α_3^{car}	296.6
θ_2	0.0061
θ_3	0.0061

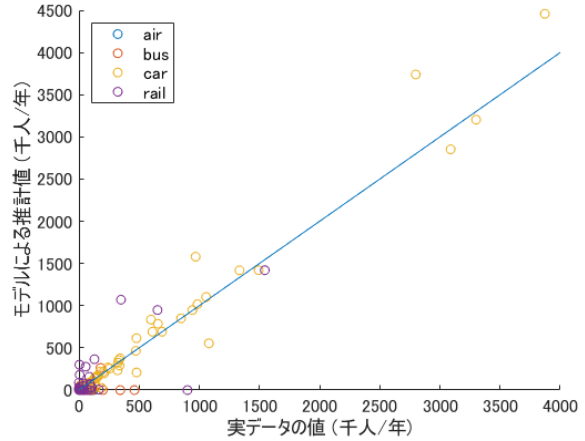


図-4 モードの交通量の実データ値と、推計したパラメータを使ってモデルで計算した値の比較。直線は実データとモデルの値が等しい点を示す。

4. まとめ

本研究では、利用者の行動を Nested Logit Model を使用して表現し、政府が財政制約下で純便益を最大化する運賃補助率とネットワークデザインを行う問題を定式化した。作成したモデルのパラメータの推計を 2015 年に実施された全国幹線旅客純流動調査の結果を利用して北海道地域に対して行った。

今後は、推計されたパラメータを利用してネットワークデザイン問題を解き、その考察を行う必要がある。

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，2016.
- 2) 北海道：北海道交通政策総合指針，2018.
- 3) 鉄道事業者と地域の協働による地域モビリティの刷新に関する検討会：地域の将来と利用者の視点に立ったローカル鉄道の在り方に関する提言，2022.
- 4) 細正隆，奥村誠：需要拡大期の都市間旅客交通ネットワーク計画のための最適化モデル，第 59 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2019.
- 5) 吉田智貴，奥村誠：費用負担スキームを考慮した都市間旅客交通ネットワークの最適構造，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol. 76, No.5, pp.I_977-

- I_986, 2021.
- 6) 佐藤佑樹, 峪龍一, 内田賢悦: 財政制約を考慮した
鉄道ネットワーク維持のための運賃補助額決定モデル
の開発, 第 64 回土木計画学研究発表会・講演集
CD-ROM, 2021.
- 7) K., Uchida, A., Sumalee, D. Watling, and R. Connors:
Study on Optimal Frequency Design Problem for Multi-
modal Network Using Probit-Based User Equilibrium As-
signment, Transportation Research Record: Journal of the
Transportation Research Board, No.1923, pp.236-245,
2005.
- 8) 国土交通省: 第 6 回全国幹線旅客純流動調査, 2019.
- 9) JTB パブリッシング: 時刻表, Vol. 91, No.10, pp.654-
997, 2015.
- (2022.?.? 受付)

OPTIMAL FARE SUBSIDY MEASURES FOR A RAILWAY NETWORK
CONSIDERING THE ELIMINATION OF LINE SECTIONS UNDER FISCAL
CONSTRAINTS

Yuki SATO, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA