

季節変動を受ける都市間鉄道の ネットワーク構造・運行量・運賃の同時最適化

吉田 智貴¹・奥村 誠²

¹非会員 株式会社 NTT ドコモ 埼玉支店
(〒330-9536 埼玉県さいたま市中央区新都心 11-1 ドコモ埼玉ビル)

E-mail: tomoki.yoshida.rm @nttdocomo.com

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所
(〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502)

E-mail: mokmr@tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

非日常目的を含む都市間交通需要は大きく季節変動する。都市間鉄道の運行に必要な施設、車両、人員などの資産は季節ごとに量を調整することが難しく、繁忙期に合わせて資産を用意すると閑散期に遊休が発生して資産の効率が低下する一方、閑散期に合わせれば繁忙期に十分な量のサービスが提供されないという問題が発生する。本研究では、最適化モデルを用いて遊休回避策の効果を定量的に分析する方法を提案する。先行研究の消費者余剰最大化モデルを、複数の季節を考慮できるように拡張し、ネットワーク内の運用リンク、運行量、運賃を季節固有の変数として扱う。車両の季節間融通と運賃の季節別設定の組み合わせのもとで、これらの変数の同時最適化を行い、総消費者余剰とそれに影響するいくつかの指標値を比較して、遊休回避策の効果を評価する。

Key Words: *intercity railway, rolling stock, idle, seasonal fare, optimization model*

1. 本研究の背景と目的

(1) 都市間交通のネットワークの特徴

都市間の旅客交通では、マイカーよりも高速な鉄道や航空が主要な手段となっている。これらは、設備やビークル（車両・機材）の準備に莫大な固定費用がかかるため、一旦準備した設備を多くの人が共同で利用することで莫大な費用を分割し運賃によって賄わせることが必要となる。このとき、運賃が安ければ収入が不足し、高すぎると利用者減を招いてしまうという根本的な問題がある。

また移動需要が存在する都市間（OD）の全てに対して個別に直行サービスを用意することは費用が大きいいため、鉄道などでは限られた区間（リンク）にサービスを提供し、OD間の旅客は、それらをつないで移動を行うことになる。このとき、ネットワークの構造によって、異なるOD間の旅客の移動がどのリンクのどのサービスによって実現されるのか、またリンクごとにどの程度の旅客が見込めるのかが大きく影響される。

サービスを成立させるだけの旅客を確保できるように低廉な運賃を設定するには、施設量や運行量に依存する費用の削減が不可欠なため、無理のない形のネットワー

ク構造を組み、旅客数に見合った無駄のない運行量を用意することが必要となる。

このように、都市間交通においては、ネットワーク構造・運行量・運賃を合理的に決定することが重要であり、本研究では、旅客の利便性の指標である総消費者余剰ととりあげ、それを最大化するようなネットワーク構造・運行量・運賃の同時最適化モデルを用いた分析を行う。

(2) 都市間交通における季節変動がもたらす問題

都市内交通に比べて、観光や私用・帰省などの割合が大きい都市間交通では需要の季節変動が大きい。このとき、多客期に合わせた量の車両や人員を用意すると、閑散期には使用されず「遊休」が発生し、資産の効率性が低下する一方、少なめに用意すると多客期には十分な量の運行がなされず混雑や移動のあきらめを余儀なくされるなど、利便性を大きく低下させてしまうという問題がある。特に都市間鉄道では、固定的なインフラ設備や車両・人員等のローリングストックの費用は莫大である¹⁾が、これらの量を季節ごとに調整することは難しい。

都市間鉄道において、上述の問題はこれまでも発生していたが、長期的に需要が伸びると考えられてきた時代には、将来を見込んで先行的に増備した車両と経年で古

くなったがまだ使用できる車両の両者を用いて、多客期の需要にある程度対応できていた。また、航空とは異なり、鉄道車両には定員を超えた混雑状態になっても運行が可能であることなどから、深刻な問題とはされてこなかったくらいがある。

しかしながら、業務の DX 化に伴って出張業務がオンライン会議などに代替されるようになったことで、都市間交通の出張需要は減少しつつあり³⁾。観光などの非日常的な交通需要の割合が増えることから、需要の季節変動への対応は都市間鉄道事業者として看過できない問題になっている。

他方、情報技術の進歩によって、過去の交通需要のデータをもとに将来の交通需要の予測が容易となり、航空業界では旅客需要の変動によって時々刻々と運賃が変動する「ダイナミックプライシング」が導入されている。鉄道業界でも、インターネットと情報を紐づけ前売り乗車券が割引されるサービスが提供され始めており、情報技術を生かした、電子化された新しい売り方の導入の機運が高まっている。

(3) 本研究の分析方針

本研究は都市間鉄道に着目し、季節間の車両融通という供給調整施策と、運賃の季節別設定という需要調整施策を導入した場合の、ネットワーク構造・運行量・運賃の同時最適化モデルの解を比較し、需要の季節変動に起因する利便性低下の抑制効果を定量的に分析する。そこで先行研究の吉田・奥村⁴⁾で開発した総消費者余剰最大化モデルを複数の季節間の需要の違いを考慮できるように拡張して、以下の表-1に示す4つのケースの最適解を求め、比較を行う。

表-1の4つの施策における①期待総消費者余剰の値を比較することで、2種類の施策とその組み合わせが利便性の確保にもたらす効果を確認する。さらに、需給バランスの状況を見るための②ODカバー数、③迂回度(式(a))、需要側の状況を見るための④平均利便性(式(b))、⑤平均運賃(式(c))の指標を算出して、施策の効果発生メカニズムを考察する。

$$\text{迂回度} = \frac{\text{総リンク通過人数}}{\text{距離を反映した OD 間総交通量}} \quad (\text{a})$$

$$\text{平均利便性} = \frac{\text{期待総消費者余剰}}{\text{距離を反映した OD 間総交通量}} \quad (\text{b})$$

$$\text{平均運賃} = \frac{\text{総運賃}}{\text{距離を反映した OD 間総交通量}} \quad (\text{c})$$

表-1 2つの施策を組み合わせた4つの計算ケース

		季節間の車両融通	
		融通不可	融通可能
OD別 運賃	通年同一	(i)	(ii)
	季節別設定	(iii)	(iv)

2. 同時最適化モデルの定式化

(1) 本研究で用いるモデルの要件と既往研究

都市間交通の特徴と研究課題に関するレビュー論文⁵⁾に示されているように、都市間旅行需要の季節変動の問題は早くから認識され、これまで交通行動分析・需要分析の分野において旅客の運賃に対する感度の把握を中心に研究されてきた。また、都市間旅客交通ネットワーク構造と固定費用を回収できる運賃の同時最適化を目指した探索手法の研究も行われている⁶⁾。さらに、より最適性の確保ができる数理計画法によるネットワーク構造の最適化の研究も積み重ねられてきている。その蓄積の上で本研究で行う分析に見合うモデルの構築を行う。

本研究のモデルが備えるべき要件は、以下の5点である。

1. 都市間交通がもつ、需要は OD ごと、供給はリンクごとに与えられるという需要と供給の空間的なずれを踏まえ、経路選択を内包してリンク交通量と OD 交通量を統合的に結合させる。
2. 交通需要を生内化し、一般化費用の制約で運賃と結合させる。
3. 運賃を生内化し、運賃で各種費用の収支を均衡させる。
4. 費用負担をバランスさせる範囲を複数設定可能とする。
5. 需要の季節変動に対し、需要側施策と供給側施策を比較可能とする。

1.について、Okumura et al.⁷⁾は複数モード間の乗継交通を考慮して、総一般化費用とネットワークの運営費用の和を最小化する Multi-modal Network Planning (MNP) モデルを提案し、環境制約や災害時の途絶リスクの考慮などの拡張がなされてきた⁸⁾。

2.について、細・奥村¹⁰⁾は OD 間のサービス改善が需要を喚起する可能性を考慮するため、線形の需要関数を仮定して消費者余剰を最大化する二次計画問題を定式化し、凸二次錐制約に変換して計算する方法¹¹⁾を提案した。

3.について、吉田・奥村¹²⁾は、ネットワーク構造と運賃構造の同時最適化ができるようモデルを拡張した。

4.について、吉田・奥村⁴⁾は、費用負担をバランスさせる範囲を複数設定可能なように費用負担スキームとい

う制約を加えモデルを拡張した。

(2) 季節別変動の考慮方法

本研究では、吉田・奥村⁴⁾の総消費者余剰最大化モデルにおいて、複数の季節を考慮し、季節別の消費者余剰の加重平均である期待総消費者余剰を目的関数として最大化するモデルを開発する。このとき、ネットワーク上の運行区間、リンクごとの頻度と OD ごとの運賃を季節別の変数として扱い、インフラ周りの固定設備の量と車両・人員等のローリングストックの量をそれぞれ定義する。

本モデルでは先に述べた、a)季節間での車両融通という供給側施策と、b)季節別運賃設定を導入するという需要側施策を、それぞれ次のように表現する。

a) 季節間での車両融通

季節別にリンク間の車両の融通ができない場合は、リンクごとに季節別の必要車両数を求め、通年ではそれらの最大値をカバーするようにリンクごとに車両を調達すると考える。季節間でリンク間の融通が可能な場合には、季節ごとに各鉄道事業者が管理する範囲のリンク全体での必要車両数を求め、それらの最大値をカバーするように通年の車両調達数を各事業者が用意すると考える。

b) 季節別運賃設定の導入

モデル上は OD ごとの運賃を季節別の操作変数として扱い、期待総消費者余剰最大化を実現するために季節別に運賃を異なる値を設定することを可能とする。また季節別運賃を導入せず運賃を通年同一に設定する場合には、運賃設定値が通年で等しいとする制約条件をつける。

(3) 集合とパラメータ、変数の定義

本モデルにおける集合・変数・パラメータとその意味は表-2の通りである。

(4) 本モデルの定式化

ネットワーク上を構成するリンクを複数の鉄道事業者が分割して管理しそれぞれ列車を運行するものとして、定式化を行う。

a) 需要関数の設定

本研究では、季節sごとに、ODkの需要関数を式(1)のように線形関数で定義し、消費者余剰CS_{ks}を式(2)のように置く。需要関数は図-1のように表せる。

$$C_{ks} = c_{ks}^{max} - \beta_{ks} \cdot Q_{ks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (1)$$

$$CS_{ks} = \frac{1}{2}(c_{ks}^{max} - C_{ks}) \cdot Q_{ks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (2)$$

本モデルでは、事業者にはゼロ利潤を仮定し、社会的

表-1 集合・変数・パラメータとその意味

集合・インデックス	
<i>N</i>	ノード <i>n</i> の集合
<i>K</i>	ODペア <i>k</i> の集合
<i>L</i>	リンク <i>l</i> の集合
<i>S</i>	季節 <i>s</i> の集合
<i>A</i>	事業者 <i>a</i> の集合
<i>La(a)</i>	事業者 <i>a</i> が管理するリンクの集合
<i>o_k</i>	OD <i>k</i> の起点ノード
<i>d_k</i>	OD <i>k</i> の終着点ノード
<i>Lo(n)</i>	ノード <i>n</i> を出発するリンクの集合
<i>Li(n)</i>	ノード <i>n</i> に到着するリンクの集合
<i>Rvl(l)</i>	逆方向リンクの集合
<i>Rvk(k)</i>	逆方向ODの集合
変数	
<i>Q_{ks}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> の交通量
<i>C_{ks}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> の一人当たり一般化費用
\bar{C}_k	OD <i>k</i> の一人当たり一般化費用の年間値
<i>CS_{ks}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> の消費者余剰
<i>X_l^{ks}</i>	季節 <i>s</i> のリンク <i>l</i> を利用するOD <i>k</i> 別のリンク交通量
<i>Z_l</i>	リンク <i>l</i> の有無を示す{0,1}変数
<i>F_l^s</i>	季節 <i>s</i> のリンク <i>l</i> の運行本数
<i>P_l^{ks}</i>	季節 <i>s</i> のリンク <i>l</i> に対するOD <i>k</i> 別の運賃負担総額
<i>PK_{ks}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> 別の運賃負担総額
<i>R_a</i>	事業者 <i>a</i> の車両調達数
<i>RR</i>	全事業者の総車両調達数の合計値
<i>RL_l</i>	リンク <i>l</i> の車両調達数
<i>U^a</i>	事業者 <i>a</i> のインフラ周りの固定費用
<i>V^a</i>	事業者 <i>a</i> の車両調達費用
<i>W^a</i>	事業者 <i>a</i> の運行費用
<i>QQ_{ks}</i>	$QQ_{ks} \geq (Q_{ks})^2$ として定義する操作変数
パラメータ	
<i>q_{ks}^{max}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> の上限交通量
<i>c_{ks}^{max}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> の旅客の支払意思額の最大値
<i>β_{ks}</i>	季節 <i>s</i> のOD <i>k</i> の逆需要関数の傾き
<i>θ_s</i>	季節 <i>s</i> の構成比率
<i>g_l</i>	リンク <i>l</i> の設定可能頻度上限値
<i>h_l</i>	リンク <i>l</i> の一番あたりの座席数
<i>t_l</i>	リンク <i>l</i> の所要時間
<i>r_l</i>	リンク <i>l</i> を運用する車両の拘束時間
<i>φ</i>	時間価値
<i>u_l</i>	リンク <i>l</i> のインフラの固定費用
<i>w_l</i>	リンク <i>l</i> の運行本数当たりの単位運行費用
<i>v̄</i>	車両調達費用

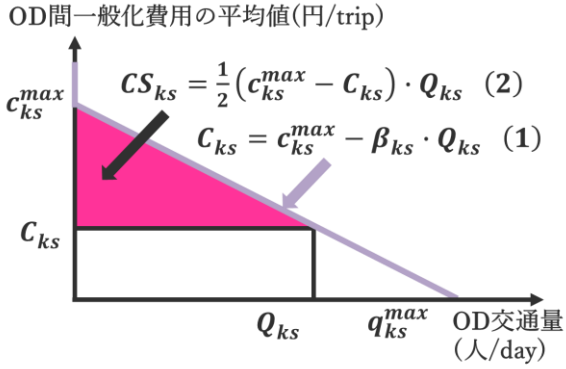


図-1 需要関数の設定

に見て最も効率的な交通サービスの実現をめざす。そのため、本研究の目的関数は、式(2)の消費者余剰 CS_{ks} の和である季節別の総消費者余剰を、季節 s の構成比率 θ_s で集計した式(3)の期待総消費者余剰であり、その最大化を行う。

$$\max_{Z, X, F, Q, C, CS, P, R, U, V, W} \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} CS_{ks} \quad (3)$$

b) 交通量保存則

式(4)が出発地保存則、式(5)が経由地保存則、式(6)が目的地保存則の制約である。また多くの利用者がサービスを利用すると考え、双方向のOD交通量が等しいとする式(7)を考える。

$$Q_{ks} = \sum_{l \in Lo(o_k)} X_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{l \in Li(n)} X_l^{ks} = \sum_{l \in Lo(n)} X_l^{ks} \quad \forall k \in K, n \in N - \{o_k, d_k\}, s \in S \quad (5)$$

$$Q_{ks} = \sum_{l \in Li(d_k)} X_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (6)$$

$$Q_{ks} = \sum_{kk \in Rvk(k)} Q_{kks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (7)$$

c) リンクサービス設定条件の制約

インフラが用意されたリンクにおけるリンクごとの頻度の制約に関する式(8)、リンクごとの輸送容量を示す式(9)、双方向の運行頻度が等しくなるよう式(10)を設定する。

$$F_l^s \leq g_l \cdot Z_l \quad \forall l \in L, s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} X_l^{ks} \leq h_l \cdot F_l^s \quad \forall l \in L, s \in S \quad (9)$$

$$F_l^s = F_{Rvl(l)}^s \quad \forall l \in L, s \in S \quad (10)$$

d) ODごとの一般化費用に関する制約

旅客の経路やOD交通量はOD間一般化費用で決まる一方、時間費用はリンクごとに与えられるため、OD間一般化費用とリンク一般化費用をつなげるための制約を式(11)のように定式化する。なお、所要時間には時間価値 φ を乗じている。また、運賃が同年同一の場合は、一般化費用が通年的に一定であることを意味する式(12)を制約に加える。

$$C_{ks} \cdot Q_{ks} \geq PK^{ks} + \varphi \cdot \sum_{l \in L} t_l \cdot X_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (11)$$

$$C_{ks} = \bar{C}_k \quad \forall k \in K, s \in S \quad (12)$$

e) 車両必要数の表現

本研究では、運行本数を操作変数に加え、インフラ周りの固定費用、車両調達費用、運行費用を分けて表現するように改良した。

各リンクの車両必要数は運行本数と各リンクの運行のための車両拘束時間の積で求められ、式(13)のように表せる。(i)リンク間の融通が不可能でリンクごとに別の車両が必要な場合には、どの季節においても各々の必要数を上回る数をリンクごとに用意する必要があり、鉄道事業者 a における通期の必要数は式(14)のようにリンクの必要数の和として表現できる。(ii)事業者が管理する複数のリンクで車両を融通可能な場合には、通期の必要数は各期の傘下のリンク全体での必要数を上回ればよく、式(15)のように表せる。さらに全事業者を合計した総車両調達数は式(16)のように表せる。

$$RL_l \geq r_l \cdot F_l^s \quad \forall l \in L, s \in S \quad (13)$$

$$R_a \geq \sum_{l \in La(a)} RL_l \quad \forall a \in A \quad (14)$$

$$R_a \geq \sum_{l \in La(a)} r_l \cdot F_l^s \quad \forall s \in S, a \in A \quad (15)$$

$$RR = \sum_{a \in A} R_a \quad (16)$$

f) 事業者の必要費用の表現

リンクに関するインフラを維持するための各事業者の固定費用の総和は式(17)のように表せる。一方、各事業者の車両調達費用は、事業者の車両調達数 R_a と車両調達費用 \bar{v} の積として、式(18)で与えられる。また運行費用は、運行本数に比例する可変費用の総和を季節 s の構

成比率 θ_s を乗じて求めた期待値として、式(19)のように表現できる。

$$U^a \geq \sum_{l \in La(a)} u_l \cdot Z_l \quad (17)$$

$$\forall a \in A$$

$$V^a \geq \bar{v} \cdot R_a \quad (18)$$

$$\forall a \in A$$

$$W^a \geq \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{l \in La(a)} w_l \cdot F_l^s \quad (19)$$

$$\forall a \in A$$

g) 運賃の表現

本研究では、柔軟な費用負担を可能にするため、同一のリンク利用者に対してOD別に異なる水準の運賃を負担させることを許し、季節別OD別のリンク費用負担総額を変数として扱う。各事業者が必要とするインフラ周りの固定費用、車両調達費用、運行費用の和を、管理するリンクのサービスに対して利用者が支払う運賃でカバーして収支を均衡させ、事業者に利潤や損失が発生しないことを仮定する。この収支均衡の制約は以下の式(20)のように表現できる。また、季節 s のOD k 別の運賃負担総額は式(21)のように表現できる。

$$\sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} \sum_{l \in La(a)} p_l^{ks} \geq U^a + V^a + W^a \quad (20)$$

$$\forall a \in A$$

$$PK^{ks} \geq \sum_{l \in L} p_l^{ks} \quad (21)$$

$$\forall k \in K, s \in S$$

h) 非負制約

各操作変数の定義域を式(22)の通りに定める。

$$\begin{aligned} Z_l^m \in \{0,1\} \\ Q_{ks}, C_{ks}, \bar{C}_k, CS_{ks}, X_l^{ks}, F_l^s, P_l^{ks}, PK^{ks}, \\ R_a, RR, U^a, V^a, W^a \geq 0 \\ \forall l \in L, k \in K, s \in S, a \in A \end{aligned} \quad (22)$$

i) 二次錐制約問題への変換と計算方法

以上のモデルは、式(2)、式(11)という非線形式を含む。これらに式変形を施し、0-1変数を含む凸二次錐計画問題に変換して計算を行う。

まず、需要関数である式(1)を式(2)、式(11)に代入して変数 C_{ks} を消去し、式(23)、式(24)のように変形する。

$$CS_{ks} = \frac{1}{2}(c_{ks}^{max} - C_{ks}) \cdot Q_{ks} = \frac{1}{2}\beta_{ks} \cdot (Q_{ks})^2 \quad (23)$$

$$\forall k \in K, s \in S$$

$$C_{ks} \cdot Q_{ks} = \{c_{ks}^{max} \cdot Q_{ks} - \beta_{ks} \cdot (Q_{ks})^2\} \geq (\text{式(10)右辺}) \quad (24)$$

$$\forall k \in K, s \in S$$

ここで、凸二次制約である式(25)を満たすように新たな変数 QQ_{ks} を定義し、式(22)と式(24)をそれぞれ式(26)、

式(27)のように置き換える。これにより目的関数と式(11)を、線形式として表現できる。

$$QQ_{ks} \geq (Q_{ks})^2 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (25)$$

$$CS_{ks} = \frac{1}{2}\beta_{ks} \cdot QQ_{ks} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (26)$$

$$c_{ks}^{max} \cdot Q_{ks} - \beta_{ks} \cdot QQ_{ks} \geq (\text{式(10)右辺}) \quad \forall k \in K, s \in S \quad (27)$$

式(26)から、目的関数の最大化のためには変数 QQ_{ks} を最大化することが望ましいが、式(25)は下限しか与えない。しかし式(27)から変数 QQ_{ks} に上限が与えられ、式(25)、(26)は実際には等式として成立することになる。よって式(3)の目的関数は式(28)のように置き換えられる。

$$\max_{Z, X, F, Q, C, CS, P, R, U, V, W} \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} \frac{1}{2}\beta_{ks} \cdot QQ_{ks} \quad (28)$$

操作変数の定義域は以下のようになる。

$$\begin{aligned} Z_l^m \in \{0,1\} \\ Q_{ks}, QQ_{ks}, C_{ks}, \bar{C}_k, CS_{ks}, X_l^{ks}, F_l^s, P_l^{ks}, PK^{ks}, \\ R_a, RR, U^a, V^a, W^a \geq 0 \\ \forall l \in L, k \in K, s \in S, a \in A \end{aligned} \quad (29)$$

最終的に本モデルは、式(28)を目的関数として、式(1)、式(4)~式(10)、式(16)~式(21)、式(23)~式(27)、式(29)の制約条件に加え、計算ケースに応じて式(12)、式(13)と式(14)の2式または式(15)を制約条件に加えた数理計画モデルとして定式化される。

(5) 数値計算の方法

以上のモデルは0-1変数を含む凸二次錐計画問題であり、最近の商用最適化ソルバーを用いて求解が可能である。実際の計算ではGurobi Optimizer 9.1.1を用いた。

3. 仮想ネットワークを用いた分析

(1) 設定した仮想ネットワーク

図-2に示す4都市に5リンクを設定可能な仮想ネットワークを考える。各リンクの所要時間はいずれも60分。2つの季節の長さは同等(季節 s の構成比率 $\theta_s = 0.5$)とする。OD別最大支払い意思額は季節によらず、長距離の0-2間で60,000円/trip、他のOD間で30,000円/tripと仮定する。ここで、0-3間と2-3間のODの上限交通量を1,000±100m、1,000±100mのように変動させる。mは変動幅を表すパラメータで0~10を与える。その他のODの上限交通量は、0-1間は4,000、0-2間と1-2間は2,000、1-3間は500であり、季節変動はないとする。

左側のリンク0-1、1-2を1つの事業者、中央から右側

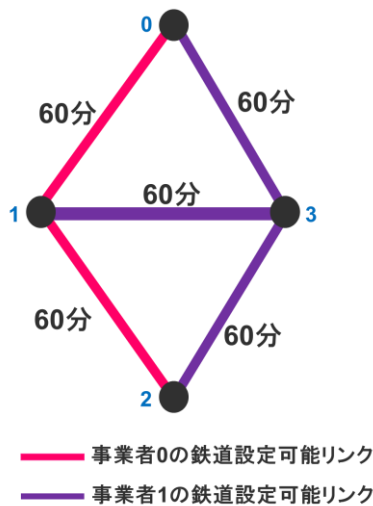


図-2 設定した仮想ネットワーク

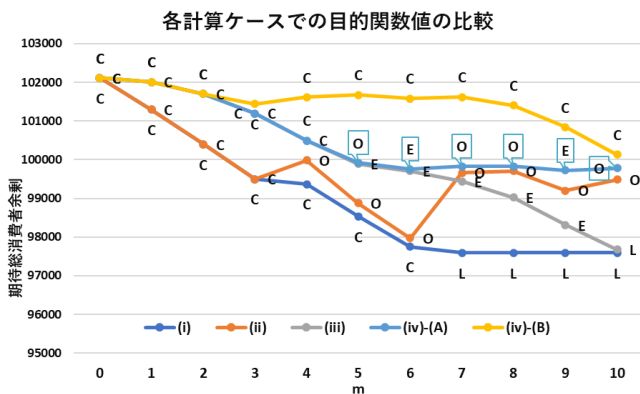


図-3 各計算ケースでの目的関数値の比較

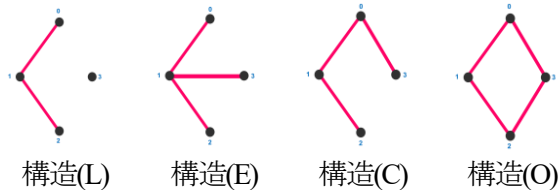


図-4 出現した最適ネットワーク構造

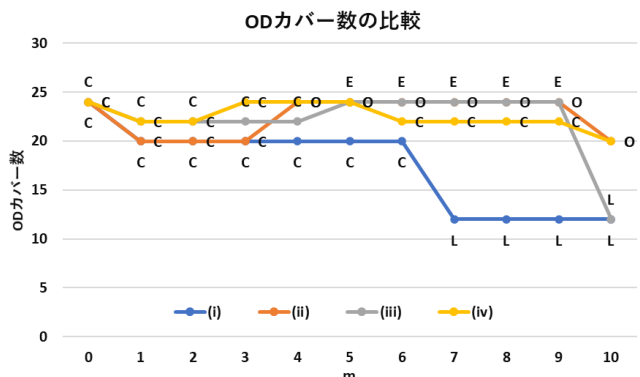


図-5 ②ODカバー数の比較

のリンク 0-3, 1-3, 2-3 を別の事業者が管理・運営すると仮定して、会社ごとに費用負担をバランスさせる場合 (A) と、ネットワーク全体で費用をバランスさせる場合 (B) の違いを分析できるようにする。これにより、季節別に需要量が異なる OD 間での車両融通、季節別運賃の

導入効果を確認することを可能とする。

鉄道の各種パラメータは、リンク固定費用を 6000,000 (円/link/day)、一便あたりの座席数を 400 (席/便)、設定可能頻度を 100 (便/day)、車両調達費用を 20,000,000/18 (円/便)、運行費用を 750 (円/day) と与える。旅客の時間価値は一律に 50 (円/分) とする。

(2) 各計算ケースの目的関数値とネットワーク構造

(A)事業者バランス下、(B)全体バランス下のそれぞれに対して表-1 の 4 ケースに対する最適化を行った。変動幅を表すパラメータを $m = 0 \sim 10$ と動かして計算した最適解の目的関数値とネットワーク構造を、図-3 に示す。この計算例では図-4 に示す 4 種類のネットワーク構造が出現した。以下ではそれぞれの構造を (L), (E), (C), (O) と名付け、図中にはその記号を表示している。

(i), (ii), (iii) の解は費用バランス範囲の影響を受けず (A), (B) と同じ最適解であったため、図-3 では、一方のみを表示している。(iv) の計算ケースのみ、費用バランスの範囲による違いが見られた。(A)事業者ごとバランス下よりも、自由度が高い (B)全体バランス下の方が、目的関数である期待総消費者余剰が大きい。また、 $m \geq 5$ では、ネットワーク構造に違いがあり、(B)の方が (A) よりリンクの数が少ない簡素なネットワーク構造となっている。

図-3 より (ii) 車両融通を単独で行うケースの一部を除けばどのケースにおいても目的関数値は m が大きいほど減少する。これより、季節変動幅が大きいほど、利便性低下が大きくなることが確認できる。

(ii) 車両融通という供給側施策と、(iii) 季節別運賃の導入という需要側施策の効果の大小関係は一定しない。 $m = 0 \sim 6$ の季節間の需要変動差が小さいときの効果は、(ii) < (iii) となり、季節別運賃の方が利便性向上に貢献できる。特に $m = 0 \sim 2$ では、車両融通の可否は目的関数の向上には全く影響しない。 $m = 7 \sim 10$ と需要変動差が大きい場合は、車両融通施策の方が効果大きい。これは、需要変動が大きい際には、車両の調達が弾力化できる供給側施策の効果が大きくなるからである。さらに、この 2 つの施策を組み合わせたケース (iv) では大きく目的関数の値が向上できている。

(3) 指標値を用いた施策の影響の考察

以下では、(B)全体バランス下の 4 つの計算ケースにおける他の各指標の計算結果を確認する。図-5 から ②ODカバー数は (i) で大幅に小さく、ODカバー数の減少が期待総消費者余剰の低下につながったことを示している。

図-6 から ③迂回度は構造 (E) の場合が大きくなっており、所要時間の増加する OD の利便性を低下させることが悪影響をもたらすと懸念される。図-7 から ④平均利便性

は $m = 7 \sim 10$ の範囲で (i) が大きい。しかしこの指標は、移動可能な OD の旅客を対象に 1 人当たりの消費者余剰を計算したものであり、移動できなかった OD を考慮していない。このためこの指標の大きい (i) の施策の期待総消費者余剰は、むしろ小さくなっていることに注意が必要である。図-8 から⑤平均運賃はリンク数が多い構造 (O) が出現すると高くなる。リンク数に応じて、供給の費用が大きくなるため、運賃を高くする必要があるためである。

(4) 分析結果のまとめ

以上の結果は次のように理解できる。この計算例では、供給側の指標は高い水準で保たれており、必要以上の供給を行って遊休を発生させるのではなく、最小限の供給にとどめて遊休の発生を防ぐ戦略がとられている。利用者の利便性の低下は、OD カバー数の減少と迂回度の増加を強く受ける。つまり、リンクの少ない簡素なネットワーク構造にすると、供給側の効率性は高まり、利用可能な OD では運賃低下にもつながる。しかし、それはいくつかの OD 旅客に対して、迂回度の上昇や移動が不可能になるという悪影響を持ち、その悪影響はメリットを上回る。

供給側のコントロールは変動幅が大きい場合に有効であるが、リンク数の増加が費用を増加させる場合がある。他方、季節別運賃は移動できる OD のカバー数を維持する効果が大きく、変動幅が小さい領域から効果が発揮されるが、変動幅が大きくなると効果は小さくなる。両者の施策を同時に導入できれば、2 つの効果を幅広く組み合わせ安定的に効果を保ち、どのような状況でも高い利便性を確保することができている。

4. おわりに

本研究では、都市間鉄道に着目し、ネットワーク構造・運行量・運賃の同時最適化の必要性を述べた。需要の季節変動がもたらす問題に対して、仮想ネットワークでの分析を行って、季節間の車両融通と季節別運賃がともに効果を持つことを示し、複数の指標に基づいてその発現メカニズムを考察した。

設定した計算例では、季節別変動は簡素なネットワークの出現をもたらす、主として OD カバー数の減少と利用客の迂回によって利便性を低下させること、変動が小さいときは季節別運賃、変動が大きくなると車両融通の効果が大きくなること、両者を同時に採用すれば、広い範囲の変動に対応でき、利便性を安定的に保つことができることが明らかとなった。

所与のネットワーク構造によって、どの OD が影響さ

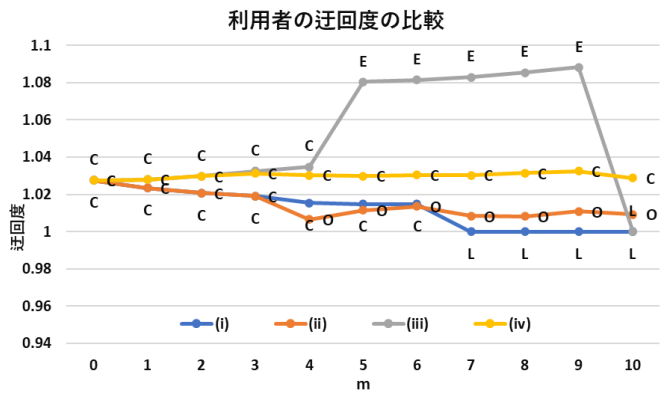


図-6 ③利用者の迂回度の比較

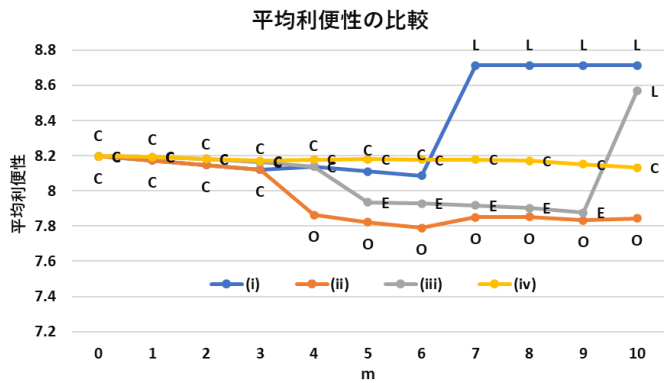


図-7 ④平均利便性の比較

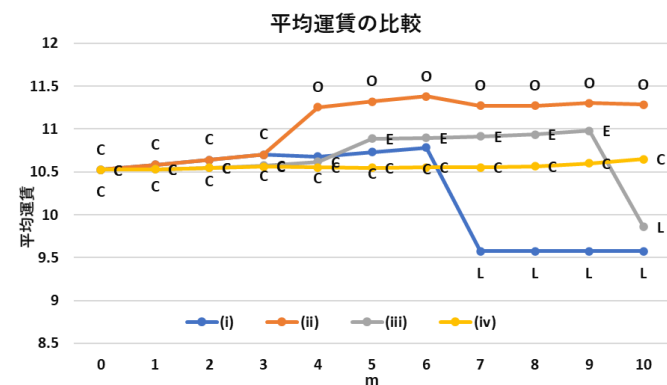


図-8 ⑤平均運賃の比較

れるかの範囲も変わるが、対象とするネットワークにおいて、どの OD に効果を持つかに注意して施策を組み合わせることが重要であると考えられる。

今後の研究課題として、異なるネットワーク構造での検討、鉄道単一のモードではなく航空やバスを含むマルチモーダルなネットワークでの分析が望まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省：地域鉄道事業者の経営状態、経費構成等や確保・維持のあり方
<https://www.tb.mlit.go.jp/kinki/content/000010127.pdf>
 (2022年1月27日閲覧)
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社：2021年3月期業績に関する説明会

- https://www.jreast.co.jp/investor/guide/pdf/202009gyoseki_guide1.pdf
(2022年1月27日閲覧)
- 3) 東洋経済オンライン：JR 東日本の「コロナダメージ」がハンパない理由 出張需要が戻らない前提の態勢転換が不可欠
<https://toyokeizai.net/articles/-/420356>
(2022年1月27日閲覧)
 - 4) 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, 2021.4, 土木学会論文集 D3,76(5), pp. I_977-I_986. DOI: 10.2208/jscejpm.76.5_I_977
 - 5) 金子雄一郎, 加藤浩徳：我が国の都市間交通研究の系譜, 土木計画学研究・講演集, Vol. 131, CD-ROM, 2005.
 - 6) 紀伊雅敦, 永野雄貴, 中村一樹, 清水裕康：効率的航空ネットワーク推計方法の開発とアフリカ発着ネットワークへの適用, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72, No. 5, pp. I_821-I_832, 2016.
 - 7) Okumura, M., Tirtom, H. and Yamaguchi, H.: Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB2012), pp. 309-314, 2012.
 - 8) Tirtom, H., 山口裕通, 奥村誠, 金進英：低炭素化政策が都市間旅客交通ネットワークの構造に与える影響, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 70, No. 5, pp. I_819-I_827, 2014.
 - 9) Tirtom, H., Okumura, M., Yamaguchi, H. and Das, R.: Network fortification model for intercity passenger transportation, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 11, pp. 75-89, 2015.
 - 10) 細正隆, 奥村誠：最適な都市間交通ネットワーク形状を分析するための需要内生型モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 74, No. 5, pp. I_779-I_786, 2018.
 - 11) 久保幹雄, ジョア ペドロ ペドロソ, 村松正和, アブドゥール レイス：新しい数理最適化 Python 言語と Gurobi で解く, 近代科学社, 2012.
 - 12) 吉田智貴, 奥村誠, 細正隆：都市間旅客交通におけるネットワーク構造と費用負担構造の同時最適化, 第 60 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2019.

(Received March 3, 2022)

(Accepted March 3, 2022)

Simultaneous optimization of network structure, operating volume, and fares for intercity railway with seasonally variational demand

Tomoki YOSHIDA and Makoto OKUMURA

Intercity passenger transportation is characterized by seasonal fluctuations in demand. There is a risk of idleness in the off-season and a decrease in the efficiency of the assets if the amount of rolling stocks such as vehicles and personnel is adjusted to the busy season. This study proposes a method to quantitatively analyze the effects of idle-avoidance measures using an optimization model. Based on the consumer surplus maximization model of the previous study, multiple seasons with different demand patterns are taken into account, and the operation links in the network, operating volume, and fare are treated as season-specific variables. We consider the combination of the interoperability of vehicles and the seasonal changes in fares as idle avoidance measures, and compare the values of total consumer surplus and other factors to assess the effect of them.