

都市間交通のネットワーク構造 ・ 運行情・ 運賃の同時最適化

Simultaneous optimization of network structure, operating volume, and fares
for intercity transportation

吉田 智貴*
Tomoki YOSHIDA

*地域計画学・レジリエンス計画研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

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, the operating volume, and the 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.

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、個人のマイカーなどでは速度が不十分であり、より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ため、その決定が難しいという問題がある。

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）にサービスを提供する。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、施設量や運行情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情を用意することが必要となる。

本研究は、都市間交通のネットワーク構造・運行情・運賃を合理的に決定するために、旅客の利便性の指標である総消費者余剰をとりあげ、それを最大化するような

ネットワーク構造・運行情・運賃の同時最適化モデル（以下本モデル）を作成する。

(2) 需要の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。

本研究では、都市間鉄道を対象としてネットワーク構造と運行情という供給側のコントロールと運賃という需要側のコントロールを組み合わせ、この需要の季節変動がもたらす問題の解決策を検討する必要があると考え、本モデルを用いた定量的な検討方法を示し、仮想ネットワーク上の計算でその有効性を確認する。

(3) 季節変動対策の効果分析の方法

本研究では、季節間の需要変動への供給側コントロール施策と需要側コントロール施策の効果を知るため、表-1に示す4つのケースの最適解を本モデルを用いて求め、比較を行う。地域ごとの複数の事業者が存在し、それぞれで費用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)の比較も行う。

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、④座席利用率、供給側の状況を見るための⑤車両稼働率、需要側の状況を見るための⑥平均利便性、⑦平均運賃の指標を算出して、施策の効果発生メカニズムを考察する。

表-2に示す。

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)

表-2 期待総消費者余剰最大化モデルの定式化

定式化
需要関数 $C_{ks} = c_{ks}^{max} - \beta_{ks} \cdot Q_{ks} \quad \forall k \in K, s \in S$ 消費者余剰 $CS_{ks} = \frac{1}{2}(c_{ks}^{max} - C_{ks}) \cdot Q_{ks} \quad \forall k \in K, s \in S$ 目的関数 $\max_{Z, X, F, Q, C, G, S, P, R, U, V, W} \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} CS_{ks}$
出発地保存則 $Q_{ks} = \sum_{l \in Lo(o_k)} X_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S$ 経路地保存則 $\sum_{l \in Li(n)} X_l^{ks} = \sum_{l \in Lo(n)} X_l^{ks} \quad \forall k \in K, n \in N - \{o_k, d_k\}, s \in S$ 目的地保存則 $Q_{ks} = \sum_{l \in Li(d_k)} X_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S$ 双方向保存則 $Q_{ks} = \sum_{kk \in Rvk(k)} Q_{kks} \quad \forall k \in K, s \in S$
リンク頻度の上限 $F_l^s \leq g_l \cdot Z_l \quad \forall l \in L, s \in S$ 座席数の制約 $\sum_{k \in K} X_l^{ks} \leq h_l \cdot F_l^s \quad \forall l \in L, s \in S$ リンク便数の対称性 $F_l^s = F_{Rvl(l)}^s \quad \forall l \in L, s \in S$
一般化費用総額の制約 $C_{ks} \cdot Q_{ks} \geq PK^{ks} + \varphi \cdot \sum_{l \in L} t_l \cdot X_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S$
通年運賃の制約 $C_{ks} = \bar{C}_k \quad \forall k \in K, s \in S$
リンク別車両必要数 $RL_l \geq r_l \cdot F_l^s \quad \forall l \in L, s \in S$ 融通不能時車両必要数 $R_a \geq \sum_{l \in La(a)} RL_l \quad \forall a \in A$ 融通可能時車両必要数 $R_a \geq \sum_{l \in La(a)} r_l \cdot F_l^s \quad \forall s \in S, a \in A$
総車両調達数 $RR = \sum_{a \in A} R_a$
インフラ費用 $U^a \geq \sum_{l \in La(a)} u_l \cdot Z_l \quad \forall a \in A$ 車両費用 $V^a \geq \bar{v} \cdot R_a \quad \forall a \in A$ 運行費用 $W^a \geq \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{l \in L(a)} w_l \cdot F_l^s \quad \forall a \in A$ 総予算制約 $\sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} \sum_{l \in La(a)} P_l^{ks} \geq U^a + V^a + W^a$ OD別運賃負担総額 $PK^{ks} \geq \sum_{l \in L} P_l^{ks} \quad \forall k \in K, s \in S$
添字の定義 $k \in K$: ODペア, $l \in L$: リンク, $s \in S$: 季節, $n \in N$: ノード, $a \in A$: 事業者
内生変数 Q_{ks} : OD交通量, C_{ks} : 平均一般化費用 (年間値は \bar{C}_k), CS_{ks} : 消費者余剰, X_l^{ks} : OD別リンク交通量, Z_l : リンクの有無, F_l^s : 運行頻度, PK^{ks} : 運賃総額 (リンク l に対しては P_l^{ks}), R_a : 事業者別調達数, RL_l : リンク別調達数, RR : 総車両調達数, U^a : 固定費用, V^a : 車両調達費用, W^a : 運行費用
パラメータ q_{ks}^{max} : 上限交通量, c_{ks}^{max} : 最大支払意思額, β_{ks} : 需要関数の傾き, θ_s : 季節の構成比率, g_l : 設定頻度上限, h_l : 一便あたりの座席数, t_l : 所要時間, r_l : 車両拘束時間, φ : 時間価値, u_l : 固定費用単価, w_l : 運行費用単価, \bar{v} : 車両調達単価

2. 同時最適化モデルの定式化

(1) 本モデルの特徴

先行研究の吉田・奥村¹⁾では、各OD旅客から集めた運賃収入を用いてインフラと運行にかかる費用を賄うという条件で利用者の利便性を最大化するようなネットワーク構造・運行量・運賃を求めるモデルを構築し、二次錐計画問題に変換して求解する方法を開発した。本モデルはこれを季節ごとの変動を表現できるように拡張する。

本モデルでは、個々の利用者は完全な情報を持ち最小費用の経路のみを選択すると仮定する。一つの最小費用経路の輸送容量が満杯になると次に一般化費用の小さい経路を用いるように、複数の経路の運賃を調整できると仮定して計算を単純化する。ここでは混雑や渋滞時間を無視しているため、ある形状のネットワーク構造の上では経路選択に外部性が存在しない。従って事業者が最適に設定した運賃に関する完全情報に基づいて、分権的な利用者の経路選択行動によりシステム最適解が実現できると考えている。

本モデルでは先に述べた、①季節間での車両融通という供給側施策と、②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。

① 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。

② 季節別運賃の導入

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。

(2) 本モデルの定式化

本モデルの定式化と集合・変数・パラメータの定義を

3. 仮想ネットワークを用いた分析結果の考察

(1) 設定した仮想ネットワーク

図-1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 $1,000 \pm 100m$, $1,000 \mp 100m$ 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。

(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-2に示す。この計算例では図-3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)とも同じ最適解であったため、図-2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-2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が大きい。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-4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-5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-6から⑥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-7から⑦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。

なお、④座席利用率と⑤車両稼働率はどのケースでも1.0に近い値を示していたため、表示は省略する。

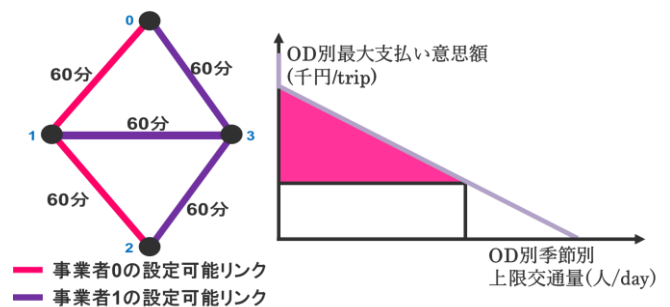


図-1 仮想ネットワークと需要関数の設定

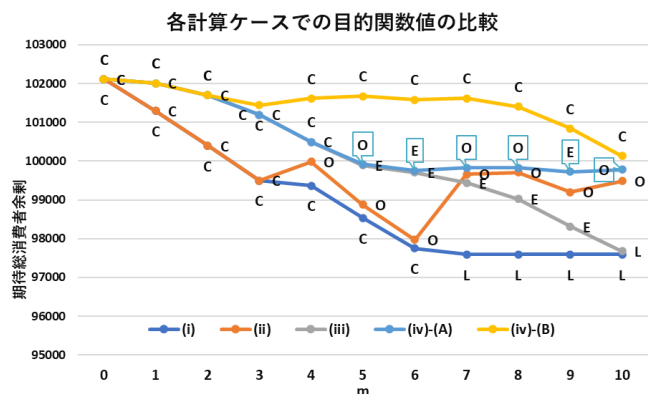


図-2 各計算ケースでの目的関数値の比較

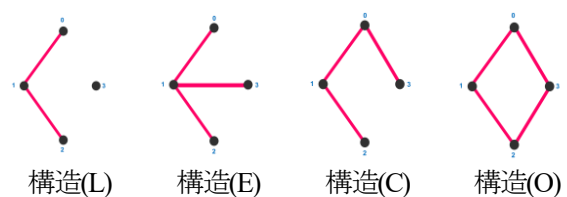


図-3 出現した最適ネットワーク構造

(4) 分析結果のまとめ

以上の結果をまとめると、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、

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻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。

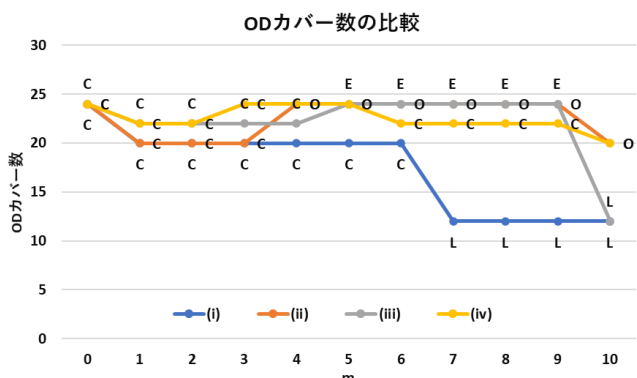


図-4 ②ODカバー数の比較

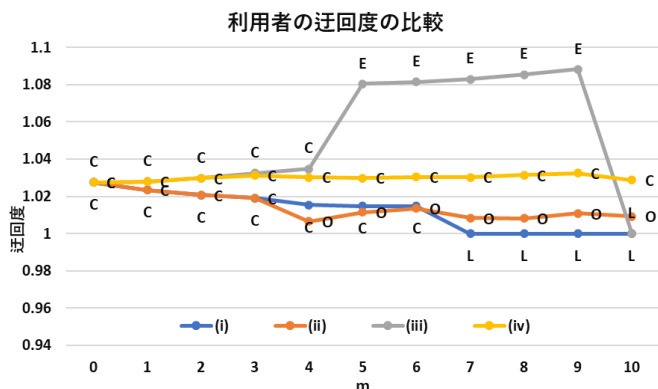


図-5 ③利用者の迂回度の比較

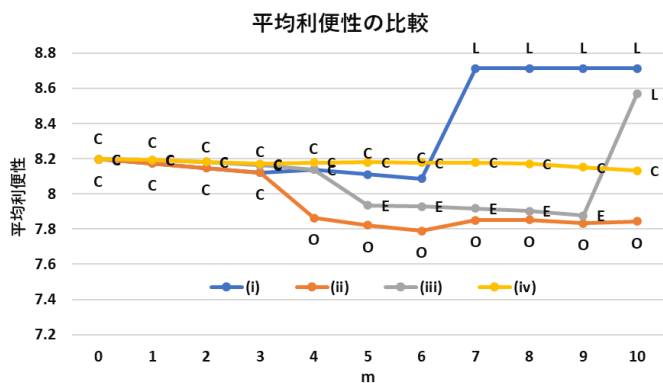


図-6 ⑥平均利便性の比較

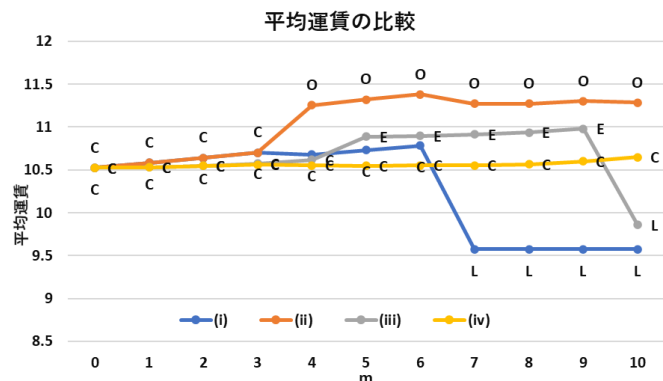


図-7 ⑦平均運賃の比較

5. おわりに

本研究では、都市間旅客交通の中でも、需要と供給の空間的なずれが顕著である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し、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が影響されるかの範囲も変わるが、今後は対象とするネットワークにおいて、どのODに効果を持つか注意して施策を組み合わせていく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) 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

(2022年2月1日提出)