

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

吉田 智貴¹・奥村 誠²・細 正隆³

¹学生非会員 東北大学工学部建築・社会環境工学科
(〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 S-502)

E-mail:tomoki.yoshida.q2@dc.tohoku.ac.jp

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:makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp

³正会員 中日本高速道路株式会社 金沢支社教賀保全・サービスセンター

(〒914-0014 福井県敦賀市井川17号字稻荷藪8-1)

E-mail:m.hoso.aa@c-nexco.co.jp

都市間旅客交通では、リンク毎に速度や基本的な費用が異なるサービスが提供され、各OD間の旅客は、それらを適宜組み合わせることで移動を行う。高速で利便性の高いサービスを設定したリンクでは、多くのODペアの旅客が利用するよう誘導する必要がある。逆に旅客数が限られるリンクは費用の小さいサービスに留めたネットワーク構造にする必要がある。この際、サービスの固定費用の負担を単純に距離に応じて賦課するのではなく、価格負担力の大きなODペアに大きく賦課すれば、全体の利用者数をより大きくできる可能性がある。本研究では、都市間旅客交通においてネットワーク構造と費用負担構造を同時に決定するモデルを提案する。すなわち、移動利便性の指標である消費者余剰を最大化する二次錐計画問題を定式化し、仮想ネットワークにて適用して得られた最適解の構造の分析を行う。

Key Words : *intercity transportation, network planning, cost burden, optimization model*

1. はじめに

本研究では、需要拡大期のネットワーク計画を想定したネットワーク最適化モデルを提案する。都市間交通ネットワークのサービスを構成するリンク別の交通サービスに提供には、利用者数に比例する可変費用の他にインフラや基礎的な資材・人員の調達のための固定費用が必要となる。したがって需要の量的な拡大により、各々のリンクサービスの固定費用部分をより多くの利用者で配分できるため、平均費用を低下させることができ、需要が活性化されるという「量的な規模の経済性効果」が働く。

さらに需要規模の増加に伴って、いくつかのリンクにおいて、多くの固定費用を必要とするものの速度等のサービス水準が優れているサービスの導入が可能になる。例えば利用者数が安定的に見込む事ができる区間では、高速バスに変わり鉄道が導入可能となる。これにより当該区間を利用する複数のOD旅客がより高度なサービスを楽しむという断続的な変化が発生する。これを「質的な規模の経済性効果」と呼ぶこととする。

都市間交通ネットワークの最適化を目指すこれまでの

モデルでは、OD需要や運賃（平均費用）を固定的に与えたものが多い。さらに現状の運賃は、近代に鉄道建設が着手された時期の事業制度に依存して、利用距離に基づく計算式を踏襲しており、可変費用に加えて固定費用の部分もほぼ利用区間の距離に応じて負担する形になっている。しかし、先述した規模の経済性を発揮させるためには、高質なサービスを提供すべき区間の運賃を割り引き、より多くの利用者を集める事が望ましい可能性もある。つまり、ネットワーク全体をより高度なサービスにより構成し効率性を高める、という視点から運賃を戦略的に設定することが重要な課題となってくる。

本研究は以上のような課題に応えるために、OD需要を内生化した上で、ネットワーク構造と費用負担構造を同時決定する最適化モデルを提案する。本モデルは0-1変数を含む二次錐計画問題となっているため、比較的容易に解くことができる。

本論文は以下のように構成される。第2章では、費用負担の合理的決定の必要性と、都市間交通ネットワークの評価・最適化に関する既往研究について述べる。第3章はモデルの定式化を行い、0-1変数を含む二次錐計画

問題として定式化出来ることを示す。第4章では、仮想ネットワークに対して本モデルを適用し、最適ネットワーク形状に関して考察を行う。第5章は結論である。

2. 費用負担の合理的決定の必要性と既往研究

(1) 費用負担の合理的決定の必要性

都市間交通網の整備において、インフラの建設・償還などの固定費用部分をどう負担すべきかについて議論になる事が少なくない。例えば整備新幹線の整備にあたっては、新規開業区間が存在する自治体が、整備費用や並行在来線の第3セクター化の負担を合意する事が前提となっている。しかし東北・北海道新幹線の盛岡以北、北陸新幹線の長野以西、あるいは九州新幹線の長崎ルート建設において、当該区間の整備便益は既開業区間（根元区間）にも及ぶはずであり「根元の区間の自治体にも何らかの負担を求めざるべきでないか」という議論が行われた。同様のことは、仙台空港アクセス鉄道整備における山形県からの出資問題においても議論となった。

本研究は、新規区間の整備がもたらす便益を最大化するために負担をどのように配分すべきかという問いに合理的に答えるという意義を有している。

(2) 既往研究

都市間交通のネットワークと運賃の同時最適化の理論的・解析的研究は研究は、極めて単純な構造のネットワークを対象として進んできた¹³⁾。しかし複数のOD交通に対する同時最適化は困難なため、運賃構造を所与とした上で遺伝的アルゴリズム(GA)などのヒューリスティクス手法を用いて擬似最適なネットワーク構造を求める研究が行われてきた⁴⁷⁾。また、シミュレーションを用いた手法としては紀伊ら⁸⁾がある。数理計画法を用いて厳密解を求めるための試みとして、Okumura et al.⁹⁾は複数モード間の乗継交通を考慮したMulti-modal Network Planning (MNP) モデルを提案した。MNPモデルは混合整数計画問題として定式化され、既存のパッケージを用いて容易に分析が可能であるという長所を持ち、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^{10,11)}。

細・奥村¹⁴⁾は、提供される交通モードに応じてOD間の一般化費用が変化し、需要が喚起され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2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¹⁵⁾を提案した。さらに細・奥村¹⁴⁾はネットワーク構造と運賃負担構造の同時最適化を意図して、出発地ごとの追加的な負担額を操作変数に加えるとともに、OD間の一般化費用と実際に利用者が各リンクで直面する金銭的・時間的コストとのバランスを表現する非

線形式を含んだ二次錐制約付きの最適化モデルを提案した。しかし、不等式制約への変換に用いるペナルティ項の設定に問題があり、収束が遅く、最適解に到達できる保証が無いという問題を残していた。

本研究では、細・奥村¹⁴⁾における上記の問題を回避し、さらに追加的な負担額を出発地ごとではなくODごとに与えることとした。これにより、異なるOD間でどのように戦略的な運賃設定がなされたのかが理解しやすくなる。さらにそれらの値を、形成されたネットワークにおける各ODペアの価格弾力性と比較することで、望ましい運賃負担のあり方を議論する。

3. モデルの概説

(1) モデルの基本構成

本研究ではOD間の需要が弾力的であると仮定し線形の需要関数を仮定する。移動利便性の指標として消費者余剰を取り上げ、それを最大とするようなネットワーク形状を導出する。

表-1 変数・パラメータとその意味

変数	意味
N	ノードの集合
K	起点(終点)ノードの集合, $K \subset N$
M	モードの集合
Z_{ij}^m	リンク ij でのモード m の有無を示す{0,1}変数
X_{ij}^{klm}	リンク ij でモード m を利用するOD(k, l)別のリンク交通量
$Y_n^{klmm'}$	ノード n でモード m からモード m' に乗り継ぐOD(k, l)別の乗継交通量
Q_{kl}	OD(k, l)間の交通量
C_{kl}	OD(k, l)間の一般化費用の平均値
CS_{kl}	OD(k, l)間の消費者余剰総額
V_{kl}	固定費用を賄う上でのOD(k, l)の旅客の金銭負担総額
QQ_{kl}	$QQ_{kl} \geq (Q_{kl})^2$ として定義する操作変数
d_{ij}^m	リンク ij でモード m を運営するための固定費用
e_{ij}^m	リンク ij でモード m を運営するためのリンクの利用者数に比例する可変費用
g_{ij}^m	リンク ij でのモード m の輸送容量
t_{ij}^m	リンク ij でのモード m の所要時間
$\tau_n^{mm'}$	ノード n でのモード m からモード m' への乗継時間
q_{kl}^{\max}	OD(k, l)での上限交通量
c_{kl}^{\max}	OD(k, l)の旅客の支払意思額の最大値
β_{kl}	OD(k, l)での逆需要関数の傾き
v	時間価値

本モデルは先行研究⁴⁾で提案した需要内生型のMNPモデルを基本としている。モード間の乗り継ぎを明示的に考慮するため、各都市ノードをモード別の着ノードと発ノードに区分し、その間に乗継時間を要する乗継リンクを設定する。また、OD間の一般化費用を意味する操作変数を追加する。本モデルは0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化され、最近の市販最適化ソルバーを用いて求解が可能である。

本モデルで用いる変数とその意味については表-1の通りである。なお、本研究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ことになるが、この場合にはOD毎の平均運賃水準を保ちつつ、複数の経路の運賃を調整して使われる全ての経路の一般化費用が等しくなるようにできるものと仮定する。本問題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は外部性が存在しない。従って利用者が一般化費用に関する完全情報を持てば、分権的な利用者の経路選択行動によりシステム最適解を実現できることになる。

(2) 定式化

a) 逆需要関数の設定

本研究では、図-1で示すようにOD(k, l)に対して線形の需要関数を定義する。この時、消費者余剰 CS_{kl} を式(2)のように二次式として定式化することが出来る。

$$C_{kl} = c_{kl}^{\max} - \beta_{kl} \cdot Q_{kl} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (1)$$

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

本研究では式(3)のように、式(2)の消費者余剰 CS_{kl} を全てのODペアについて足し合わせた総消費者余剰を目的関数として、これを最大化する。

$$\max_{x, y, Q, C, CS, v} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl} \quad (3)$$

b) 交通量保存則

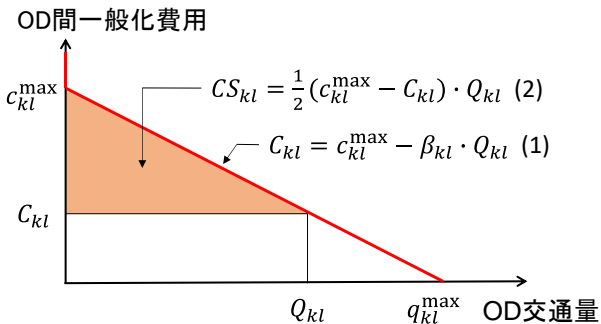


図-1 OD(k, l)の逆需要関数

交通量保存則は先行研究と同様のものとする。式(4)、式(5)が発ノードに関する制約、式(6)、式(7)が着ノードに関する制約である。

$$\sum_{j \in N} X_{nj}^{klm} = \sum_{m' \in M} Y_n^{klmm'} \quad (4)$$

$$\forall k \in K, l \in N, n \in N, m \in M$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in N} X_{kj}^{klm} = Q_{kl} \quad (5)$$

$$\forall k \in K, l \in N$$

$$\sum_{m' \in M} Y_n^{klmm'} = \sum_{i \in N} X_{in}^{klm} \quad (6)$$

$$\forall k \in K, l \in N, n \in N, m \in M$$

$$Q_{kl} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} X_{il}^{klm} \quad (7)$$

$$\forall k \in K, l \in N$$

c) リンクサービス設定のための制約

リンクサービスは双方向同時に運営されると考え、式(8)を設定する。また、輸送容量を超えない範囲でサービスを行うため、式(9)を設定する。

$$Z_{ij}^m = Z_{ji}^m \quad \forall i \in N, j \in N, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} X_{ij}^{klm} \leq g_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (9)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

旅客の経路やOD交通量はOD間の一般化費用で決まる一方、その旅客が支払う運賃や時間費用は経路上のリンクごとに与えられるため、OD間の一般化費用とリンクでの一般化費用をつなげるための制約が必要となる。本モデルでは、この関係を式(10)のように定式化する。

$$C_{kl} \cdot Q_{kl} \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm} + v \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm} + v \cdot \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \tau_n^{mm'} \cdot Y_n^{klmm'} + V_{kl} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (10)$$

式(10)は左辺がOD間の一般化費用、右辺は順に利用したリンクの可変費用負担額、所要時間、乗継時間、及び固定費用の金銭負担額を意味している。なお、時間を金銭換算するため、所要時間と乗継時間については時間価値 v を乗じている。先行研究と異なり、本モデルではリンク交通量 X_{ij}^{klm} と乗継交通量 $Y_n^{klmm'}$ をOD(k, l)別に定義したため、式(10)もOD(k, l)別に定式化している。

V_{kl} は可変費用に対応する運賃に対して余分に付加される金銭的負担をOD(k, l)別に集計した総額である。従来の公共経済学の標準的な議論では、価格(運賃)は限界費用と一致するように設定する事が望ましいが、交通サービスのように固定費用を必要とし平均費用が通減する産業では赤字が発生するため、平均費用分の付加が必要となるとされてきた。しかし相互に影響を持つ複数の

市場において具体的な設定方法が理論的に確立しているわけではなく、実用上は、限界費用や利用距離などに比例する形で設定されてきたと考えられる。そこで本モデルでは V_{kl} を自由に設定し、得られた V_{kl} の値の構造を分析することで、固定費用をどのように分担させることが望ましいかについて検討を行う。

全リンクのうち、サービスが設定された区間には固定費用が必要となる。これを、全OD利用者から集めた金銭負担額によってカバーするため、式(11)を設定する。

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} V_{kl} \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} d_{ij}^m \cdot z_{ij}^{km} \quad (11)$$

d) 非負制約

各操作変数の定義域を式(12)の通りに定める。

$$\begin{aligned} & Z_{ij}^m \in \{0,1\}, V_{kl} \in \mathcal{R}, \\ & X_{ij}^{klm}, Y_n^{klmm'}, Q_{kl}, C_{kl}, CS_{kl} \geq 0 \quad (12) \\ & \forall n, i, j, l \in N, k \in K, m, m' \in M \end{aligned}$$

なお、 V_{kl} について、式(11)が満足される限りは一部のODに対して負の値を与えて優遇を行なっても構わない。そのため定義域は実数全体としている。

(3) 二次錐制約問題としての定式化

前節での定式化に存在する非線形制約 (式(2), 式(10))を凸二次錐制約に変形する。

まず、逆需要関数である式(1)を式(2), 式(10)に代入して変数 C_{kl} を消去し、式(13), 式(14)のように変形する。

$$CS_{kl} = \frac{1}{2}(c_{kl}^{\max} - C_{kl}) \cdot Q_{kl} = \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot (Q_{kl})^2 \quad (13) \quad \forall k \in K, l \in N$$

$$\begin{aligned} C_{kl} \cdot Q_{kl} &= \{c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot (Q_{kl})^2\} \\ &\geq (\text{式(10)右辺}) \quad (14) \\ &\quad \forall k \in K, l \in N \end{aligned}$$

ここで、凸二次制約である式(15)を満たすように新たな変数 QQ_{kl} を定義し、式(13)と式(14)をそれぞれ式(16), 式(17)のように置き換える。これにより目的関数である消費者余剰を線形式として表現できる。

$$QQ_{kl} \geq (Q_{kl})^2 \quad \forall k \in K, l \in N \quad (15)$$

$$CS_{kl} = \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \quad (16) \quad \forall k \in K, l \in N$$

$$c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \geq (\text{式(10)右辺}) \quad (17) \quad \forall k \in K, l \in N$$

式(16)から、目的関数の最大化のためには変数 QQ_{kl} を最大化することが望ましいが、式(15)は下限しか与えない。しかし式(17)から変数 QQ_{kl} に上限が与えられ、式(15), (17)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(18)のように置き換えられる。

$$\max_{x,y,Q,QQ,CS,V} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \quad (18)$$

操作変数の定義域は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & Z_{ij}^m \in \{0,1\}, V_{kl} \in \mathcal{R}, \\ & X_{ij}^{klm}, Y_n^{klmm'}, Q_{kl}, QQ_{kl}, CS_{kl} \geq 0 \quad (19) \\ & \forall n, i, j, l \in N, k \in K, m, m' \in M \end{aligned}$$

(4) 定式化のまとめ

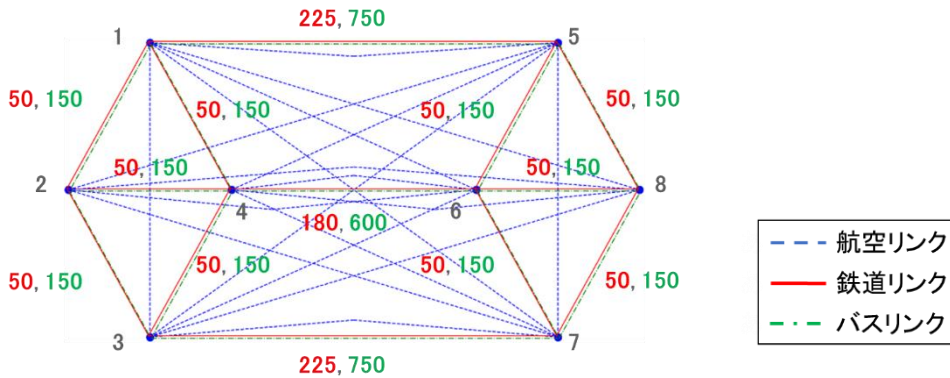
最終的に本モデルは、式(18)を目的関数として、式(4)~式(9), 式(11), 式(15)~式(17), 式(19)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。このモデルは0-1変数を含む凸二次錐計画問題であり、最近の商用最適化ソルバーを用いて求解が可能である。実際の計算ではGurobi Optimizer 8.1を用いた。

4. 仮想ネットワークでの分析結果

(1) 仮想ネットワークとパラメータの設定

本モデルを仮想ネットワークに適用して、得られる最適ネットワーク形状を分析する。

図-2で示したような仮想ネットワークを考える。このネットワークでは、図に示した2ノード間に航空リンク、鉄道リンク、バスリンクを設定可能とする。図-2に示した各値は、それぞれ鉄道リンクとバスリンクの所要時間(分)であり、航空の所要時間は表-2の通りとする。



※図中の値は鉄道リンク、バスリンクの所要時間(分)

図-2 仮想ネットワーク

各モードの特徴を踏まえ、表-3のように固定費用、可変費用、輸送容量を与える。各パラメータはリンクごとに異なる値を設定可能だが、本研究では単純化のためリンクの場所や距離によらず等しい値を与える。なお、輸送容量は十分に大きな値としており、混雑は発生しないものとする。また、モード間の乗継時間 $\tau_n^{mm'}$ を表-4のように、ノードの場所によらず等しい値を与える。

上限交通量 q_{kl}^{max} と支払意思額の最大値 c_{kl}^{max} をそれぞれ表-5、表-6のように与える。表-5の値は各ノードの需要規模を表していると考えることが出来、どのノードも需要規模は概ね等しいとする。旅客の時間価値 v は一律に50 (円/分) と置く。

(2) 価格弾力性と固定費用負担額の比較

先行研究の細・奥村¹⁹⁾では、支払意思額の最大値 c_{kl}^{max} は固定した上で、上限交通量 q_{kl}^{max} の値を全てのODペア

について一様に比例的に変化させ、複数の需要規模での最適ネットワーク形状を導出している。本研究のモデルでも同様に需要規模を変えることで、異なる最適ネットワーク形状が確認できるが、以下では需要規模が表-5で与えられる標準的なケースを対象に分析を行う。この時に最適ネットワークは、図-3のような鉄道リンクと航空リンクから成り立ち、航空リンクに関しては鉄道経由では3リンクを要する長距離のノード間には必ず設定される左右対称のネットワークである。

最適解におけるOD旅客一人当たりの固定費用負担額 V_{kl}/Q_{kl} の値は表-7に示す。これより、OD旅客一人当たりの固定費用負担額は移動距離が長くなるほど大きな負担をしている関係が読み取れる。その関係を確認するため、旅客の一人当たりの負担のうち、可変費用と所要時間分である $C_{kl} - V_{kl}/Q_{kl}$ を求めて横軸にとり、縦軸に V_{kl}/Q_{kl} を取ったグラフを各起点に対して作成した。図-

表-2 航空リンクの所要時間

リンク	所要時間 (分)	リンク	所要時間 (分)
1 3	100	3 5	155
1 5	150	3 6	145
1 6	145	3 7	150
1 7	155	3 8	160
1 8	160	4 5	145
2 5	160	4 6	135
2 6	150	4 7	145
2 7	160	4 8	150
2 8	165	5 7	100

表-3 各モードの固定費用、可変費用、輸送容量

モード	固定費用 (円/day)	可変費用 (円/人)	輸送容量 (人/day)
航空	1,500,000	12,000	15,000
鉄道	12,000,000	3,000	15,000
バス	100,000	2,000	15,000

表-4 モード間の乗継時間 (分)

	航空	鉄道	バス
航空	30	60	60
鉄道	60	0	15
バス	60	15	0

表-5 上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	合計
1	0	7,680	3,840	7,680	1,536	1,536	1,280	1,280	24,832
2	7,680	0	7,680	7,680	1,280	1,536	1,280	1,280	28,416
3	3,840	7,680	0	7,680	1,280	1,536	1,536	1,280	24,832
4	7,680	7,680	7,680	0	1,536	1,920	1,536	1,536	29,568
5	1,536	1,280	1,280	1,536	0	7,680	3,840	7,680	24,832
6	1,536	1,536	1,536	1,920	7,680	0	7,680	7,680	29,568
7	1,280	1,280	1,536	1,536	3,840	7,680	0	7,680	24,832
8	1,280	1,280	1,280	1,536	7,680	7,680	7,680	0	28,416
合計	24,832	28,416	24,832	29,568	24,832	29,568	24,832	28,416	215,296

表-6 支払意思額の最大値 (円/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	15,000	30,000	15,000	75,000	75,000	90,000	90,000
2	15,000	0	15,000	15,000	90,000	75,000	90,000	90,000
3	30,000	15,000	0	15,000	90,000	75,000	75,000	90,000
4	15,000	15,000	15,000	0	75,000	60,000	75,000	75,000
5	75,000	90,000	90,000	75,000	0	15,000	30,000	15,000
6	75,000	75,000	75,000	60,000	15,000	0	15,000	15,000
7	90,000	90,000	75,000	75,000	30,000	15,000	0	15,000
8	90,000	90,000	90,000	75,000	15,000	15,000	15,000	0

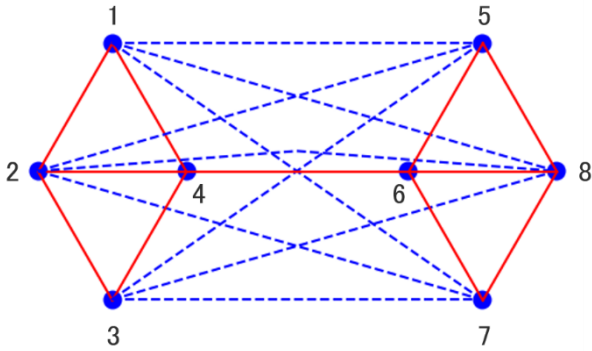


図3 分析する最適解におけるネットワーク構造

3は左右対称のネットワークであるので、4つの起点に対して図-4、図-5、図-6、図-7を作成した。これらのグラフにおいていずれも正の相関が見られ、これらから可変費用や所要時間を多く負担する遠距離の旅客は、一人当たりの固定費用も多く負担していることがわかる。

さらに、旅客の価格負担力との関係を確認するために、各OD間の価格弾力性 E_{kl} との関係を確認する。本研究では逆需要関数を式(1)のように与えているので、これを Q_{kl} について解くと式(20)となり、 C_{kl} で両辺微分して式(21)が得られる。

$$Q_{kl} = \frac{c_{kl}^{\max} - C_{kl}}{\beta_{kl}} \quad (20)$$

$$\frac{dQ_{kl}}{dC_{kl}} = -\frac{1}{\beta} \quad (21)$$

価格弾力性 E_{kl} は式(22)のように求めることができる。

$$E_{kl} = \left| \frac{\text{需要の変化率}(\%)}{\text{価格の変化率}(\%)} \right|$$

$$= \left| \frac{\frac{dQ_{kl}}{Q_{kl}}}{\frac{dC_{kl}}{C_{kl}}} \right| = \left| \frac{dQ_{kl}}{dC_{kl}} \cdot \frac{C_{kl}}{Q_{kl}} \right| \quad (22)$$

$$= \frac{1}{\beta_{kl}} \cdot \frac{C_{kl}}{Q_{kl}}$$

図-3のネットワーク構造に対応する最適解に対して、式(22)から求めた価格弾力性 E_{kl} の値を表-8に示す。

表-7と比較すると、価格弾力性 E_{kl} の小さなOD旅客は固定費用負担額が大きい傾向が見て取れる。

表-7 OD旅客一人当たりの固定費用負担額 V_{kl}/Q_{kl} (円/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	929	1,858	929	5,429	5,624	6,873	6,845
2	929	-	929	929	6,848	5,624	6,844	6,823
3	1,858	929	-	929	6,868	5,624	5,428	6,848
4	929	929	929	-	5,624	4,694	5,624	5,624
5	5,429	6,848	6,869	5,624	-	929	1,858	929
6	5,622	5,624	5,624	4,694	929	-	929	929
7	6,873	6,847	5,428	5,624	1,858	929	-	929
8	6,848	6,821	6,848	5,624	929	929	929	-

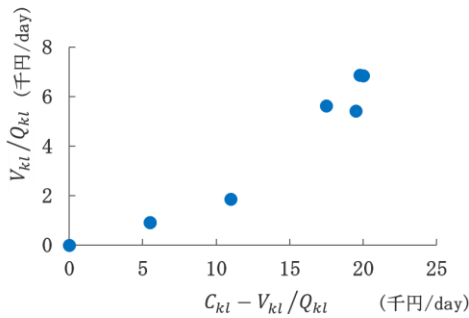


図4 起点 $k = 1$ に対する V_{kl}/Q_{kl} と $C_{kl} - V_{kl}/Q_{kl}$ の関係

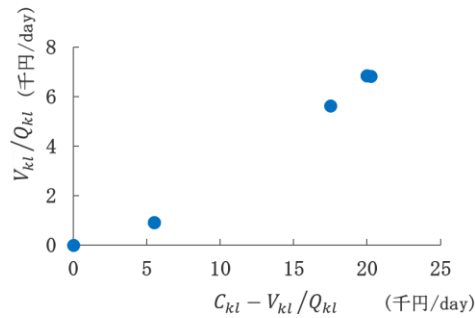


図5 起点 $k = 2$ に対する V_{kl}/Q_{kl} と $C_{kl} - V_{kl}/Q_{kl}$ の関係

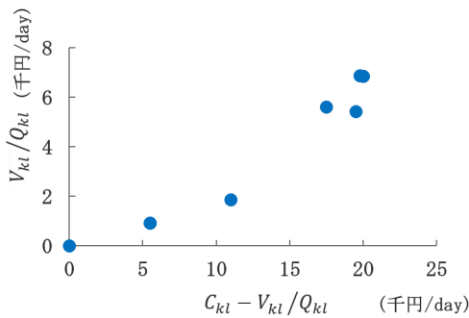


図6 起点 $k = 3$ に対する V_{kl}/Q_{kl} と $C_{kl} - V_{kl}/Q_{kl}$ の関係

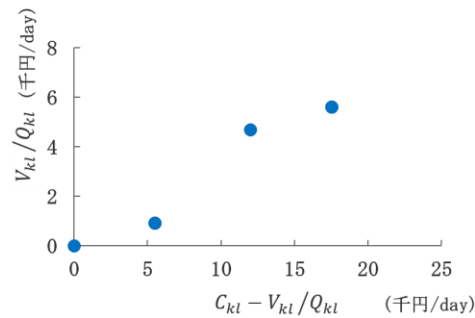


図7 起点 $k = 4$ に対する V_{kl}/Q_{kl} と $C_{kl} - V_{kl}/Q_{kl}$ の関係

表-8 価格弾力性 E_{kl}

OD	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.750	0.750	0.750	0.498	0.446	0.420	0.425
2	0.750	-	0.750	0.750	0.425	0.446	0.425	0.430
3	0.750	0.750	-	0.750	0.420	0.446	0.498	0.425
4	0.750	0.750	0.750	-	0.446	0.386	0.446	0.446
5	0.498	0.425	0.420	0.446	-	0.750	0.750	0.750
6	0.446	0.446	0.446	0.386	0.750	-	0.750	0.750
7	0.420	0.425	0.498	0.446	0.750	0.750	-	0.750
8	0.425	0.430	0.425	0.446	0.750	0.750	0.750	-

5. 終わりに

本研究では、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を同時決定するための最適化モデルを提案した。本研究で提案した最適化モデルは、リンクサービスの可変費用分だけでなく、固定費用分もリンク利用者が負担すると考えている。また、本モデルは二次錐計画問題として定式化され、比較的容易に求解出来る。

次に本モデルにパラメータを外生的に与えて最適解を求めた。得られたネットワーク構造と負担額の値について、ODごとの価格弾力性の値と比較をしたところ、価格弾力性の小さなOD旅客に大きな固定費用の負担を課していることがわかった。

参考文献

- 1) Jiang, C. and Zhang, A.: Effects of high-speed rail and airline cooperation under hub airport capacity constraint. *Transportation Research Part B*, Vol.60, pp.33-49, 2014.
- 2) Takebayashi, M.: Multiple hub network and high-speed railway: Connectivity, gateway, and airport leakage, *Transportation Research Part A*, Vol.79, pp.55-64, 2015.
- 3) Takebayashi, M.: How could the collaboration between airport and high speed rail affect the market?, *Transportation Research Part A*, Vol.92, pp.277-286, 2016.
- 4) 村上直樹, 竹内太郎, 奥村誠, 塚井誠人: 航空との補完的サービスを考慮した最適鉄道運行計画, 土木計画学研究・論文集, No.23, pp.629-634, 2006.
- 5) 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方法に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_903-I_916, 2016.
- 6) 波床正敏, 中川大: 幹線鉄道網の最適化基準が路線網形成に与える影響の比較分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.I_957-I_966, 2011.
- 7) 波床正敏, 中川大: 整備スキーム改善による幹線鉄道網
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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

(2019.10.4 受付)

Simultaneous optimization of network structure and cost burden structure in intercity passenger transportation

Tomoki YOSHIDA, Makoto OKUMURA and Masataka HOSO

In intercity passenger traffic, services with different speeds and basic costs are provided for each link, and passengers between each OD move by combining them appropriately. Links with high-speed and convenient services must be guided to be used by many OD pair passengers. Conversely, links with limited number of passengers need to have a network structure with only low-cost services. In this case, it is possible that the total number of users can be increased if a large burden is sought on the OD pair with a large price burden, instead of a simple method according to the distance for the fixed cost of the service. In this study, we propose a model that determines the network structure and cost sharing structure at the same time in intercity passenger traffic. In this model, we take the consumer surplus as an indicator of mobility convenience and formulate the mathematical programming problem. Next, this model is applied to a virtual network, and the structure of the obtained optimal solution is analyzed through comparing with price elasticities.