

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

吉田 智貴¹・奥村 誠²

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
(〒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

交通サービスの提供にはネットワークの整備のための多額の固定費用を要するため、需要規模に応じた効率的な計画を立てることが必要である。また都市間旅客交通においては、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ことに注意したネットワーク設計が求められる。本研究では、複数の交通モードを含む最適ネットワーク構造を求める二次錐計画モデルにおいて、ネットワークの固定費用を運賃によって負担させるスキームを複数設定できるように拡張した。それを仮想ネットワークに適用し、費用負担スキームごとの最適ネットワーク構造の分析を行った。

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

1. はじめに

(1) 都市間旅客交通の特徴と課題

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の提供には、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が、特に鉄道などの都市間の交通サービスは固定費用が莫大にかかるという特徴がある。したがって需要規模に合ったネットワークのサービス水準を見通すことが不可欠である。

都市間旅客交通サービスの供給はリンクごとに行われ、速度の異なるサービスが設定され、可変費用や固定費用などリンク維持にかかる費用も異なる。一方で、旅客は、各々のOD間移動において適宜リンクを組み合わせることで移動を行う。すなわち、都市間旅客交通サービスの供給はリンク単位に行われるが、需要はODごとの市場の中で決定されるという特徴がある。さらにリンクサービスレベルが変化すると、そこを用いるODの組み合わせも変化するという複雑な関係がある。

したがって、都市間旅客交通のネットワーク計画の研究を行うにあたっては、リンクごとの供給要件とODごとの需要との関係を、適切に結ぶモデルを用いる必要がある。

(2) 戦略的な運賃設定の可能性

都市間を移動する旅客が感じるコストとしては、自動車交通のように所要時間が卓越するわけではなく、公共交通機関の運賃負担が重要な部分を占める。すなわち、旅客の一般化費用には所要時間だけではなく、モード間の乗継時間と公共交通を利用する際にかかる運賃の負担が大きな割合を占める。

都市間交通ネットワークの最適化を目指すこれまでの研究では、OD需要や運賃（平均費用）を固定的に与えたものが多い。また現状の運賃は、鉄道建設が着手された時期の事業制度に依存した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距離に応じて負担する形になっている。しかし、高質なサービスを提供すべき区間の運賃を戦略的に割り引き、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、運賃による負担額を操作変数として扱い、ネットワーク構造と同時に決定することを考慮する価値がある。

この時、ネットワークの整備運営費用の負担スキームについて、複数の設定ができる。つまり、利用したOD旅客だけでリンクごとに負担させるのか、モードごとの事業者内で内部補助を認めるのか、地域ごとにバランスさせるのか、ネットワーク全体でバランスさせるのか、というような負担スキームが考えられる。本研究では異

なる費用負担スキームを考慮できるように拡張したモデルを用いて、都市間旅客交通ネットワークの最適構造を分析していく。

(3) 本論文の構成

本論文は以下のように構成される。2.では、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。その中で、都市間交通におけるサービス供給側と需要側を適切に関連づけるMNPモデルに関する既往研究をレビューし、同モデルを拡張した本研究の位置づけを述べる。3.では本研究で用いるモデルの定式化を行う。4.では、仮想ネットワークとパラメータの設定について述べる。さらに、異なる負担スキームのもとでの最適ネットワーク構造に関して考察を行う。最後に5.で本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

(1) 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、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¹⁾。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²⁾。また、シミュレーションを用いた手法としては紀伊ら³⁾がある。GAには日本全国を対象とするような大規模なネットワークにおける計算が可能という長所があるものの、GAによって得られる解には大域的最適解となる保証がないという問題がある。

数理計画法を用いて最適ネットワークの厳密解を求めるための試みとして、Okumura et al.⁴⁾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)モデルを提案した。MNPモデルはリンクサービスの有無を表す0-1変数と、交通費に関する連続変数を持ち、費用最小化を目的とする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っている。MNPモデルはそれ以来、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¹²⁾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MNPモデルを拡張し、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するとともに、凸二次錐制約に変換して計算する方法¹³⁾を提案した。さらに細・奥村¹⁴⁾はOD間の一般化費用を操作変

数として扱い、ネットワーク構造と費用負担の同時最適化を意図したモデルを提案した。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。吉田・奥村・細¹⁵⁾では、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ごとに与えた。

(2) 本研究の位置づけ

本研究では、ネットワーク構造と運賃負担の同時最適化を意図した吉田・奥村・細¹⁵⁾のモデルを拡張し、より柔軟で戦略的な運賃設定を求めることができるように改良する。まず、リンク ij でモード m を利用するOD(k, l)別の運賃負担総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加える。

さらに、OD旅客がが運賃によって費用を負担するスキームとして、i) リンクごとにバランスさせる場合、ii) モード別の事業者ごとに内部補助を認め、モード別にバランスさせる場合、iii) リンクを地域やモードを考慮してグループ化し、そのグループごとに事業者に運営を行わせ、事業者内での内部補助を認める場合、iv) ネットワーク全体(国全体)の全ノードでバランスさせる場合、v) 費用の一部を政府が別途税金により徴収した財源の中から負担するという場合の5つの負担スキームを想定できるようにモデルを拡張する。i) ~ iv) を比較することによって、需要規模が安定している場合に、運賃負担をどのように配分すれば新規の都市間旅客交通網の整備がもたらす便益を最大化できるか、そして最適な都市間旅客交通ネットワーク構造に与える影響についての分析を可能とし、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を確認する。さらに、iv) とv) を比較することで、都市間旅客交通網の整備費用の一部に政府が徴収する税金を投入することが最適ネットワーク構造に与える影響についての分析を可能とする。

3. モデルの概説

(1) モデルの基本構成

本モデルは先行研究¹⁴⁾で提案した需要内生型のMNPモデルを基本としている。すなわち、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して、全ODについての消費者余剰の総和を最大とするようなネットワーク構造を導出する。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。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。

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。

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
H	事業者の集合
$L(h)$	事業者 h が管理するリンクの集合
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_{ij}^{klm}	リンク ij でモード m を利用するOD(k, l)別の運賃負担総額
G	固定費用を賄う上での政府の負担総額
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
ω	十分大きな任意の定数
θ	固定費用の政府負担率

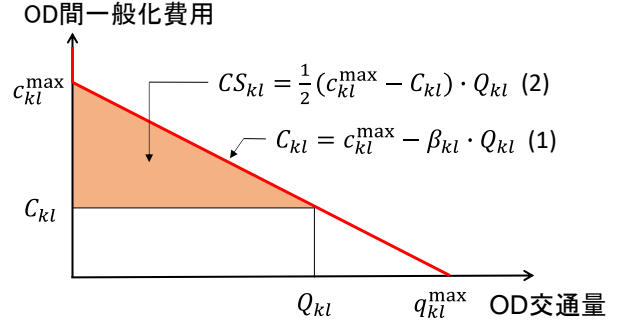


図-1 OD(k, l)の需要関数

(2) 二次式を含む計画問題の定式化

本モデルで用いる集合・変数・パラメータとその意味については表-1の通りである。

a) 需要関数の設定

本研究では、図-1で示すようにOD(k, l)ごとに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できる。

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

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

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

交通量保存則は先行研究と同様のものとする。式(4)が出发点ノード、式(5)が途中のノードの到着側、式(6)が途中ノードの出発側、式(7)が目的地ノードに関する制約である。

$$Q_{kl} = \sum_{m \in M} \sum_{j \in N} X_{kj}^{klm} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} X_{in}^{klm} = \sum_{m' \in M} Y_n^{klmm'} \quad \forall k \in K, l \in N, n \in N, m \in M \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} Y_n^{klmm'} = \sum_{j \in N} X_{nj}^{klm'} \quad \forall k \in K, l \in N, n \in N, m' \in M \quad (6)$$

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

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。

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

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

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OD(k, l)別に成立すべき関係を、式(10)のように定式化する。

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

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運賃負担総額、所要時間費用、乗継時間費用を意味している。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。

e) 運賃の制約

V_{ij}^{klm} は利用リンクの運賃負担をOD(k, l)別に集計した総額である。利用者は自らが利用しない区間の運賃を負担する必要はなく、運賃は非負であると仮定する。これらの条件は以下のように表現できる。

$$V_{ij}^{klm} \leq \omega \cdot X_{ij}^{klm} \quad \forall k \in K, l \in N, i \in N, j \in N, m \in M \quad (11)$$

$$V_{ij}^{klm} \geq 0 \quad \forall k \in K, l \in N, i \in N, j \in N, m \in M \quad (12)$$

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遞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。本モデルでは V_{ij}^{klm} を自由に設定し、得られた V_{ij}^{klm} の値の構造を分析することで、望ましい運賃負担のあり方を検討することが可能となっている。

f) 費用負担スキームの表現

ネットワーク上でサービスが設定された区間リンクには固定費用が必要となる。これを利用者が支払う運賃のうち固定費用を上回る部分を集約してカバーする。この時の費用負担スキームとして、i) リンクごとにバランスさせる場合、ii) モード別の事業者ごとに内部補助を

認め、モード別にバランスさせる場合、iii) リンクを地域やモードを考慮してグループ化し、そのグループごとに事業者運営を行わせ、事業者内での内部補助を認める場合、iv) ネットワーク全体（国全体）の全ノードでバランスさせる場合、v) 費用負担の一部（ θ 倍）を政府が別途税金により徴収した財源の中から負担し、残り（ $1 - \theta$ 倍）を全利用者から集めた金銭負担額によってカバーするという場合の5つのスキームを考える。i) ~iv) のそれぞれの負担スキームに応じて、式(13)から(16)を設定する。

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall i \in N, j \in N, m \in M \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall m \in M \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{(i,j,m) \in L(h)} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq \sum_{(i,j,m) \in L(h)} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall h \in H \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in K} \sum_{m \in M} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (16)$$

v) の負担スキームについては以下の式(17)、式(18)を設定し、目的関数として式(19)の総消費者余剰から政府負担のための税額を差し引いた社会的余剰を用いる。

$$G \geq \theta \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq (1 - \theta) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (18)$$

$$\max_{x,y,Q,C,CS,V,G} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl} - G \quad (19)$$

g) 非負制約

各操作変数の定義域を式(20)の通りに定める。

$$Z_{ij}^m \in \{0,1\}, V_{ij}^{klm} \geq 0, X_{ij}^{klm}, Y_n^{klmm'}, Q_{kl}, C_{kl}, CS_{kl}, G \geq 0 \quad \forall n, i, j, l \in N, k \in K, m, m' \in M \quad (20)$$

(3) 二次錐制約問題への変換

本モデルでは、式(2)、式(10)が操作変数どうしの積を

含むため、このままでは求解が困難である。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(10)に代入して変数 C_{kl} を消去し、式(21)、式(22)のように変形する。

$$CS_{kl} = \frac{1}{2}(c_{kl}^{\max} - C_{kl}) \cdot Q_{kl} = \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot (Q_{kl})^2 \quad (21)$$

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

$$C_{kl} \cdot Q_{kl} = \{c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot (Q_{kl})^2\} \geq (\text{式(10)右辺}) \quad (22)$$

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

ここで、凸二次制約である式(23)を満たすように新たな変数 QQ_{kl} を定義し、式(21)と式(22)をそれぞれ式(24)、式(25)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。

$$QQ_{kl} \geq (Q_{kl})^2 \quad (23)$$

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

$$CS_{kl} = \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \quad (24)$$

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

$$c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \geq (\text{式(10)右辺}) \quad (25)$$

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

式(24)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(23)は下限しか与えない。しかし式(25)から変数 QQ_{kl} に上限が与えられ、式(23)、(25)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(26)のように置き換えられる。また、式(19)のケースv) の場合の目的関数は式(27)のように書き換えられる。

$$\max_{x,y,q,qq,cs,v} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \quad (26)$$

$$\max_{x,y,q,qq,cs,v} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot QQ_{kl} - G \quad (27)$$

操作変数の定義域は以下ようになる。

$$\begin{aligned} Z_{ij}^m &\in \{0,1\}, V_{kl} \geq 0, \\ X_{ij}^{klm}, Y_n^{klmm'}, Q_{kl}, QQ_{kl}, CS_{kl} &\geq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

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

(4) モデルの計算方法

最終的に本モデルは、式(26)または式(27)を目的関数として、式(4)~式(9)、式(11)、式(12)、式(13)~式(16)のうちの一つもしくは式(17)~式(18)、式(23)~式(25)、式(28)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。

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 8.1を用いた。

4. 仮想ネットワークの分析

(1) 仮想ネットワークとパラメータの設定

本研究では2つの仮想ネットワークに前章のモデルを適用し、最適ネットワーク構造の分析を行う。

仮想ネットワーク I は6つのノードと4つのモード（新幹線、在来線特急、バス、航空）から成るネットワークであり、モードごとに図-2~図-5のようなリンクを設定可能とする。図中の黒色の番号はノード番号で、リンクには所要時間（分）を付記している。これらのリンクは、地域やモードを反映した図-6、図-7、図-8に示す3つのグループごとに、事業者 h_1, h_2, h_3 が管理すると仮定する。

各リンクの固定費用、可変費用、輸送容量を表-2のように与える。本モデルではリンクごとに異なる値を設定可能だが、ここでは簡単化のためモードごとに等しい値を与える。また、輸送容量は十分に大きな値としており、

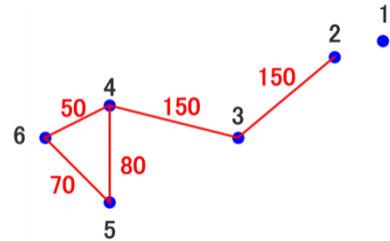


図-2 新幹線設定リンクと所要時間

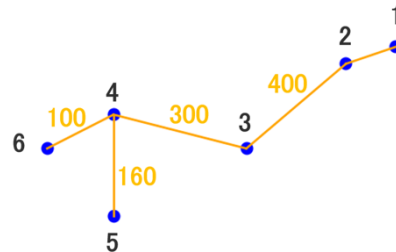


図-3 在来線特急設定リンクと所要時間

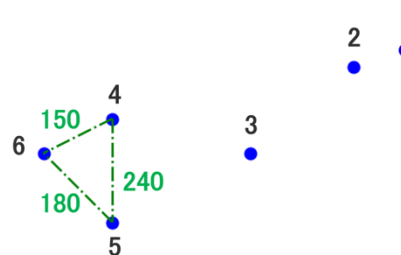


図-4 バス設定リンクと所要時間

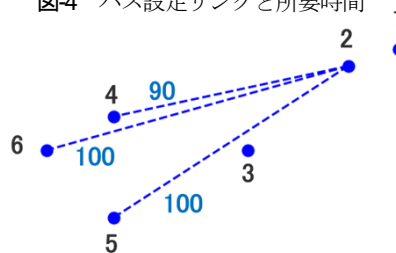


図-5 航空設定リンクと所要時間

表-2 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 (千人/day)
新幹線	12,000,000	3,000	150,000
在来線特急	3,000,000	2,000	150,000
バス	100,000	2,000	150,000
航空	2,000,000	13,000	150,000

表-3 モード間の乗継時間 (分)

モード	新幹線	在来線特急	バス	航空
新幹線	0	15	15	120
在来線特急	15	0	15	120
バス	15	15	0	120
航空	120	120	120	30

表-4 上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3	4	5	6
1	0	200,000	100,000	5,000	1,000	500
2	200,000	0	200,000	12,000	1,500	1,100
3	100,000	200,000	0	6,000	1,000	500
4	5,000	12,000	6,000	0	5,000	5,000
5	1,000	1,500	1,000	5,000	0	3,000
6	500	1,100	500	5,000	3,000	0

表-5 支払意思額の最大値 (円/人/day)

OD	1	2	3	4	5	6
1	0	20,000	120,000	135,000	135,000	135,000
2	20,000	0	100,000	120,000	120,000	120,000
3	120,000	100,000	0	65,000	80,000	80,000
4	135,000	120,000	65,000	0	40,000	25,000
5	135,000	120,000	80,000	40,000	0	21,000
6	135,000	120,000	80,000	25,000	21,000	0

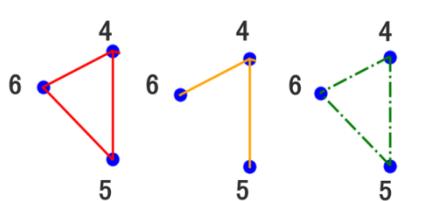


図-6 事業者 h_1 の管理するリンクグループ

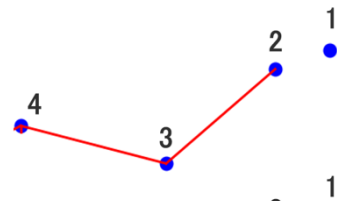


図-7 事業者 h_2 の管理するリンクグループ

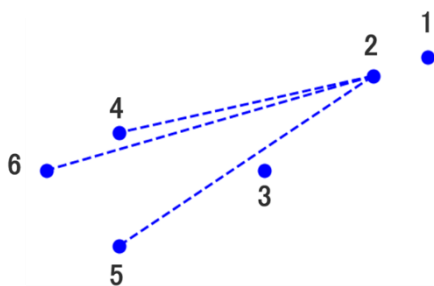


図-8 事業者 h_3 の管理するリンクグループ

混雑や乗り残しは発生しないものとする。モード間の乗継時間 $\tau_n^{mm'}$ を表-3のようにノードの場所によらず等しい値を与える。ODごとの上限交通量 q_{kl}^{max} と支払意思額の最大値 c_{kl}^{max} をそれぞれ表-4, 表-5のように与える。旅客の時間価値 v は一律に50 (円/分) と置く。十分大きな

任意の定数 ω は 10^9 とおく。

仮想ネットワークIIは3つのノードと2つのモード(鉄道, バス)から成る単純な構造のネットワークである。各モードの設定と各リンクの所要時間を図-9に示す。各モードの固定費用, 可変費用, 輸送容量を表-6のように

表-6 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 (万人/day)
鉄道	12,000,000	3,000	1,500,000
バス	100,000	2,000	1,500,000

表-7 モード間の乗継時間 (分)

モード	鉄道	バス
鉄道	0	15
バス	15	0

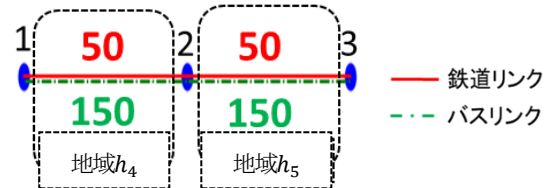
表-8 上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3
1	0	12,400	2,480
2	12,400	0	6,200
3	2,480	6,200	0

表-9 支払意思額の最大値 (円/人/day)

OD	1	2	3
1	0	15,000	18,000
2	15,000	0	15,000
3	18,000	15,000	0

与え, モード間の乗継時間 $\tau_n^{mm'}$ を表-7のように与える. ODごとの上限交通量 q_{kl}^{max} を表-8, 支払意思額の最大値 c_{kl}^{max} を表-9に示す. 2つの地域それぞれを事業者 h_1, h_2 が管理すると考える. 旅客の時間価値 v は一律に50 (円/分) と置き, 十分大きな任意の定数 ω は 10^{13} とおく.



※図中の値は鉄道リンク, バスリンクの所要時間 (分)

図-9 仮想ネットワーク II

(2) 需要規模の変化によるネットワーク構造の変化

まず, 仮想ネットワーク I において, 需要規模の変化最適なネットワーク構造に与える影響を分析する. 費用負担スキームを i) とし, 支払意思額の最大値 c_{kl}^{max} を固

定した上で, 先行研究¹⁴⁾と同様に全てのODペアの上限交通量 q_{kl}^{max} の値を表-4で与えた値から一様に比例的に変化(α 倍)させることで, 異なる需要規模を与えた.

需要倍率を $0.1 \leq \alpha \leq 2.0$ の範囲で0.01ずつ変化させ

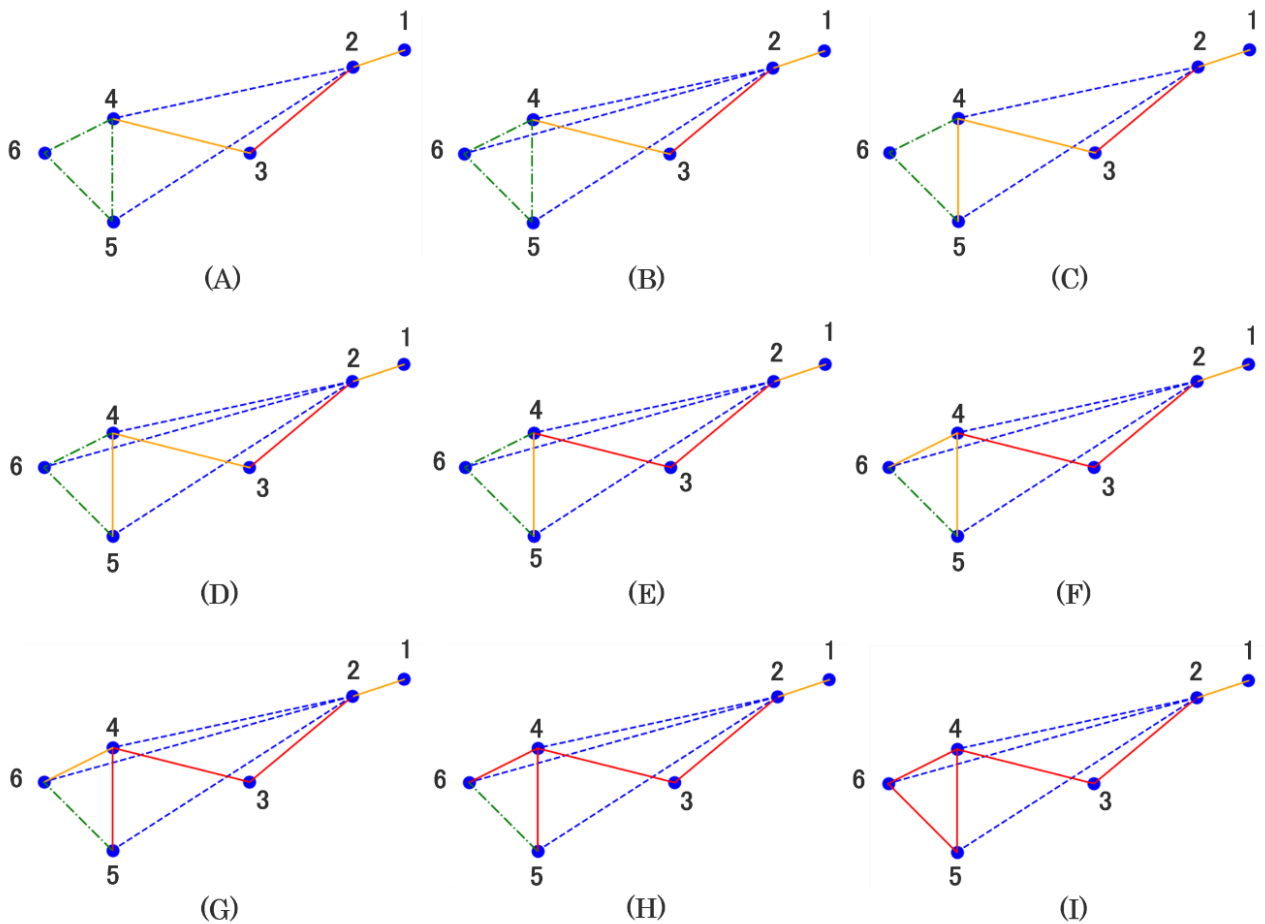


図-10 需要規模の拡大に伴うネットワーク構造の変遷

表-10 政府負担の有無による最適ネットワークと総消費者余剰，社会的総余剰の比較

需要倍率 α	iv)全体負担		v)政府半額負担($\theta = 0.5$)		
	構造	総消費者余剰 (=社会的総余剰)	構造	総消費者余剰	社会的総余剰
0.10	A	2973.2	A	2995.6	2973.3
0.15	B	4483.8	B	4508.2	4483.9
0.20	D	5995.6	D	6022.9	5995.7
0.25	E	7512.2	E	7548.5	7512.3
0.30	E	9029.1	E	9065.5	9029.3
0.35	F	10546.8	F	10586.0	10546.9
0.40	F	12064.7	F	12103.9	12064.8
0.45	F	13582.6	F	13621.8	13582.7
0.50	F	15100.5	F	15139.7	15100.6
0.55	F	16618.4	F	16657.6	16618.5
0.60	F	18136.3	F	18175.4	18136.3
0.65	G	19655.2	G	19703.4	19655.3
0.70	G	21174.5	G	21222.7	21174.6

(百万円/day)

た場合，図-10の(A)~(I)のような9種類のネットワーク構造が順番に現れた。すなわち， $\alpha = 0.1$ では(A)， $0.11 \leq \alpha \leq 0.17$ では(B)， $\alpha = 0.18$ では(C)， $0.19 \leq \alpha \leq 0.2$ では(D)， $0.21 \leq \alpha \leq 0.31$ では(E)， $0.32 \leq \alpha \leq 0.61$ では(F)， $0.62 \leq \alpha \leq 1.38$ では(G)， $1.39 \leq \alpha \leq 1.51$ では(H)， $1.52 \leq \alpha \leq 2.0$ では(I)となった。(B)から(C)で在来線特急リンクが増える際に，航空リンクが一度減り，(C)から(D)へ変わる過程で航空リンクが復活する。

このように，需要規模の拡大に従ってバスリンクが在来線特急リンクへ，そして在来線特急リンクが新幹線リンクと変わる。すなわち，需要が拡大するとリンク固定費用をより多くの利用者で分担できるため，平均費用が低下する。そのため，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より多くのリンクで可能になることを示している。

(3) 政府負担の有無がネットワーク構造に与える影響

次に同じ仮想ネットワークIIにおいて，政府負担の影響を分析する。ここでは，iv)ネットワーク全体で負担する場合と，v)政府負担として固定費用の半額を負担する場合 ($\theta = 0.5$) を比較する。

需要規模が $0.10 \leq \alpha \leq 0.70$ の範囲で0.05ごとに変化させ，2つの負担方式での最適ネットワークと総消費者余剰，社会的総余剰を計算した結果を表-10に示す。

表-10より，政府負担の考慮により最適ネットワークの構造は変わらないが，総消費者余剰が増加し，税金負担分を差し引いた社会的総余剰もわずかながら大きくなる。この結果から，政府が一部の負担を行うと，運賃がより自由に設定でき，社会的総余剰が拡大するケースが

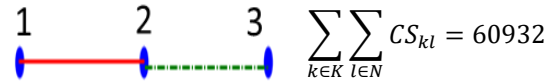


図-11 i) リンク別負担，iii) 地域別負担の場合の最適ネットワーク構造と総消費者余剰の値

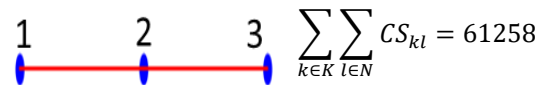


図-12 ii) モード別負担，iv) 全体負担の場合の最適ネットワーク構造と総消費者余剰の値

存在することが示された。

(4) 費用負担スキームがネットワーク構造に与える影響

同一の需要規模においても，費用負担スキームが異なれば，最適ネットワーク構造が変化する可能性がある。そこで，仮想ネットワークIIを対象に，4つの負担スキームに対する最適ネットワーク構造を求めた。

i) リンク別負担(式(13)) およびiii) 地域別負担(式(15))の場合の最適ネットワーク構造は図-11，ii) モード別負担(式(14))およびiv) 全体負担(式(16))の場合の最適ネットワークは図-12のようになった。この時，OD別の最適運賃は，図-11の2ケースでは3つのODペア(1,2)，(2,3)，(1,3)それぞれに対して4784円/人，2320円/人，5129円/人であり，図-12の2ケースではそれぞれ5674円/人，5674円/人，7970円/人であった。すなわち前者では需要規模にあわせて2つの地域の負担額は異なるが，後者においては2地域の区間運賃に差が見られない。そして，ODペア(1,2)の運賃は，ii) モード別負担・iv) 全体負

担の場合の方が、i) リンク別負担・iii) 地域別負担の場合よりも高くなっている。すなわち、ある区間の旅客が運賃を多く支払い、別の区間の固定費用を負担すれば、鉄道の導入が可能となるということである。また、両者とも遠距離運賃は短距離に比べて割安であるが、後者の方が(1, 2)の鉄道運賃が高く、遠距離の割引率は若干大きくなっている。

5. おわりに

(1) 本研究のまとめ

本研究では都市間旅客交通ネットワーク計画問題について、サービス供給側をリンク別で、旅客をOD別の変数として表したMNPモデルを基礎として、異なる費用負担スキームのもとで、戦略的な運賃設定を求めめるための計画モデルを提案した。

次に、2つの仮想ネットワークを設定し、モードの特徴を踏まえてパラメータ値を与えて最適ネットワーク構造を求めた。

まず複数の需要規模に対応する最適ネットワーク構造を求めた結果、需要規模が小さな場合は、バスや在来線主体のネットワーク構造となるが、需要の拡大とともに、固定費用が大きくなる新幹線リンクの導入が可能となることが分かった。次に、旅客の運賃負担に加えて、政府が一部の費用を負担すれば、税負担上昇分を差し引いても、社会的総余剰の増加につながる事が示された。

ついで、需要規模を固定して費用負担スキームの違いが最適ネットワーク構造に与える影響の分析を行った結果、当該区間を利用した旅客だけではなく、別の区間において同一のモードを利用した旅客やネットワーク全体の旅客に負担を課せば、当該区間に高度なサービスの導入が可能となるケースが存在することが分かった。

(2) 今後の課題

本研究では費用負担スキームを変えることで、より高度なネットワークを形成できる可能性を示すことができた。今後は、このような効果が出現する条件を明らかにするために、綿密な分析を行う必要がある。また、より現実の状況を反映した複雑なネットワークに適用してゆくことも必要であると考えられる。

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における地域間交流活性化に関する定量的研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.I_725-I_736, 2015.
- 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プ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
- 15) 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

(2020.3.8 受付)

OPTIMAL NETWORK STRUCTURE OF INTERCITY PASSENGER TRANSPORTATION CONSIDERING COST SHARING SCHEMES

Tomoki YOSHIDA and Makoto OKUMURA

Intercity passenger transportation, services with different speeds and basic costs are supplied for each link with considerable fixed cost, and passengers between each OD move by combining the link-based service appropriately. Total cost to construct and maintain link service in the network is shared by fare paid by the passengers. In this case, it is possible that the total number of users can be increased if a larger part of the cost is shared by the OD pair passengers relatively less elastic, 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 fare of OD, under one of the several cost sharing schemes. In this model, we maximize the social surplus, that is total consumer surplus minus tax amount of government. Next, this model is applied to a virtual network, and the optimal network structure under different cost-sharing schemes and different demand size are analyzed.