

# 都市間交通でのマルチモーダルネットワーク 計画のための需要内生型最適化モデル

細 正隆<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S502)

E-mail:masataka.hoso.s2@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S502)

E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

我が国は人口減少時代に突入し、都市間交通全体の需要も減少しつつある。需要の量的な減少は高速にサービスの維持を困難にし、旅客の移動における一般化費用の増加という質的な低下をもたらすことで、さらなる量的な減少につながる可能性がある。このような負の連鎖を避けるためには、ネットワーク全体を視野に入れて質の維持のために重要な路線を把握することが重要である。本研究では、複数のモードを考慮した最適なネットワークを計画するための Multi-Modal Network Planning Model<sup>1)</sup>を異なる時間価値の需要を生産化するモデルに拡張する。このモデルを活用して、需要の量的な減少が質の低下をもたらすプロセスを時間価値の違いを踏まえながら消費者余剰を用いて分析する方法を提案し、仮想ネットワークへの適用例を通して、その有用性を確認する。

**Key Words:** *intercity transportation, multi-modal, optimal network, demand-endogenized, time value*

## 1. はじめに

我が国は人口減少時代に突入し、都市間交通全体の需要も減少しつつある。需要の量的な減少は収入の減少に直結し、路線を維持していくための事業者の負担の増加につながる。さらに、事業者の判断によりその路線が廃止されれば、それまでその路線を利用していた旅客はより費用や時間のかかる経路での移動を強いられ、移動における質的な低下が生じる。この質的な低下がさらなる量的な減少につながる可能性もある。このような負の連鎖を避けるため、質の維持のために重要な路線を把握することが重要となる。このとき、ある都市間を移動する旅客は、航空や鉄道、高速バスが直行のサービスを提供していても、複数のサービスを乗り継ぎながら移動する可能性がある。また、それぞれが異なるコスト関数やサービスレベルを持つため、維持すべき路線はネットワーク全体の中で把握する必要がある。

本研究では、複数のモードを考慮した最適なネットワークを計画するための Multi-Modal Network Planning Model (以下、MNP モデル)<sup>1)</sup>を異なる時間価値の需要を生産化する形に拡張する。ついで、このモデルを活用して、需要の量的な減少に伴う質的な低下のプロセスを、時間価値の違いを踏まえながら消費者余剰を用いて分析

する方法を提案する。さらに、仮想ネットワークへの適用例を通して、その有用性を確認する。

## 2. 既存研究

都市間の旅客交通ネットワークの評価に関する研究は数多く存在する。一般化費用の変化に伴う需要の変化が見込まれる場合には消費者余剰に基づく便益評価がなされており、栢元ら<sup>2)</sup>、村上ら<sup>3)</sup>、渡邊ら<sup>4)</sup>で利用されている。また、都市間交通ネットワークの最適な形状を求める研究も数多くなされており、例えば波床・中川<sup>5)</sup>や Tirtom ら<sup>6)</sup>などがある。

これらのネットワークの評価や最適化では、サービスレベルの変化に伴う旅客の経路の変化をどのように評価するかという問題が共通して存在する。サービスが縮小される状況であれば、あらかじめ存在するリンクを対象に K 番目経路探索などを適用して、利用できる可能性のある経路を列挙しておくことが出来る。栢元ら<sup>2)</sup>、村上ら<sup>3)</sup>、渡邊ら<sup>4)</sup>はこの事前列挙法を用いている。ただし、この方法ではサービスレベルの変化で経路が大きく異なる旅客の表現が困難である。一方、Tirtom ら<sup>6)</sup>の用いている MNP モデルは経路の列挙を生産化した混合線

形計画問題であり、このような問題を回避できる。本研究ではこの MNP モデルを需要内生型に拡張し、移動利便性の変化が需要に反映する効果を取り込む。

都市間交通では、同一の OD であっても旅客は様々な経路を選択し得る。異なる経路が選ばれる理由として、旅客の時間価値の違いが考えられる。最適なネットワーク形状を旅客の時間価値の違いから分析したものとして、Kawasaki<sup>7)</sup>や山口ら<sup>8)</sup>がある。Kawasaki<sup>7)</sup>では、時間価値の異なる 2 種類の旅客(業務と観光)を仮定した航空ネットワークを分析することで、業務向けのハブ&スポーク型のサービスと観光向けのポイント to ポイントが両立するような戦略が採択され得る結果が得られている。一方、山口ら<sup>8)</sup>は、航空と鉄道で構成されたネットワークにおいて、特に需要規模が小さい状況では、航空と鉄道それぞれのサービス特性を補完しあう形状が最適となり得ることを示している。本モデルでは複数の時間価値の需要を内生化したところに新規性がある。

### 3. モデルの定式化

#### (1) 本モデルの基本構成

本モデルでは、複数の OD 間、時間価値別の旅客を複数のモードで構成されたネットワーク上に配分し、後で定義する社会的純便益が大きくなるようなネットワーク形状を定める。各リンクには利用者数に関係なくサービス維持のための固定費用が存在するため、旅客の移動利便性とリンクの固定費用のトレードオフの中で効率的なネットワーク形状を考えることになる。

なお、本研究では最適化計算により形成されるネットワーク形状に関心があるため、個々の旅客の経路選択行動や事業者の採算性は考慮しない。もちろん、このモデルにより得られた旅客の経路配分を実現するためには、経路別に運賃の差をつけて旅客を誘導する必要があるが、事業者間の金銭のやり取りがキャンセルアウトするような運賃を設定するような問題は、別途線形計画問題として定式化できる。

#### (2) 本モデルの操作変数について

都市ごとにノード  $n \in N$  を置き、それらを繋ぐ方向別のリンクをモード別 ( $m \in M$ ) に定義する  $m \times (i, j)$ 。また、モード間の乗り継ぎを表現するため、各ノードをモード別の着ノードと発ノードに区分し、その間に乗継リンク  $n \times (m, m')$  を設定する。さらに、一部のノードを起点ノード  $k \in K \subset N$  とする。時間価値は  $v \in V$  とする。

操作変数は 7 つある。リンクサービスの有無を示す 0-1 変数を  $Z_{mij}$  と置く。また、旅客の流動を表す変数を 4 つ定義するが、全て起点別、時間価値別、モード別に与

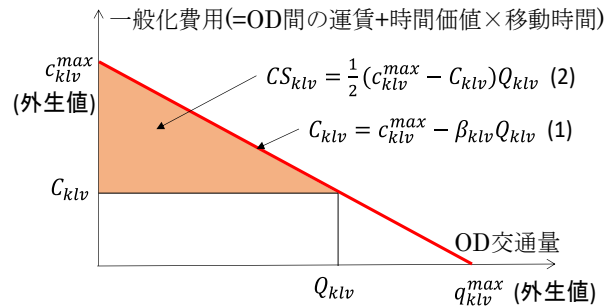


図1 起終点( $k, l$ )、時間価値 $v$ の旅客の逆需要関数

える。具体的にはリンク交通量を  $X_{mij}^{kv}$ 、ノードでの乗継交通量を  $Y_{nmm'}^{kv}$ 、発生交通量を  $B_m^{kv}$ 、集中交通量を  $A_{lm}^{kv}$  と置く。さらに、OD 間の一般化費用を時間価値別に  $C_{klv}$ 、OD 交通量を時間価値別に  $Q_{klv}$  で与える。パラメータとしてリンクでの運賃や所要時間、ノードでの乗継時間などを考えるが、次節以降、逐次説明していく。

#### (3) 逆需要関数

起終点( $k, l$ )、時間価値 $v$ ごとに OD 交通量を図 1 のような

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

という線形の逆需要関数で与える。  $c_{klv}^{max}$  はこの OD 間の最大の支払意志額、  $q_{klv}^{max}$  はこの OD 間の上限交通量であり、どちらも外生的に与える。このとき、OD 間の旅客の移動利便性を式(2)のような消費者余剰  $CS_{klv}$  で評価することができる。

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

なお、旅客がどのような経路を利用しても必ず一般化費用がかかるため、OD 交通量  $Q_{klv}$  が外生値である上限交通量  $q_{klv}^{max}$  を上回ることにはない。一方で、旅客の経路によっては一般化費用  $C_{klv}$  が外生値である支払い意志額の最大値  $c_{klv}^{max}$  を上回ってしまう可能性が存在する。本モデルでは  $C_{klv} \leq c_{klv}^{max}$  とすることで、そのような経路が選ばれないようにしている。

#### (4) 費用の考え方

##### a) 旅客の一般化費用

一般化費用  $C_{klv}$  は、当該 OD、時間価値の旅客が利用するリンクとノード内での移動費用の総和として考え、旅客 1 人あたりの平均値を計算する。リンクでの移動費用は外生的に与えた運賃と時間費用の和とし、これにアクセス、乗り継ぎ、イグレスで発生する時間費用の和を加算する。

リンクでの運賃を  $p_{mij}$ 、時間を  $t_{mij}$  と置くと、リンク移動費用の和は式(3)のように起点別、時間価値別に定式化でき、これを便宜的に  $LC_{kv}$  とする。

$$LC_{kv} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (p_{mij} + v_v t_{mij}) X_{mij}^{kv} \quad (3)$$

$\forall k \in K, v \in V$

また、アクセス時間を  $s_{km}$ 、乗継時間を  $\tau_{nmm'}$ 、イグレス時間を  $r_{lm}$  と置くと、それぞれでの時間費用の和も式(4)のように起点別、時間価値別に定式化でき、これを便宜的に  $NC_{kv}$  と置く。

$$NC_{kv} = v_v \left( \sum_{m \in M} s_{km} B_m^{kv} + \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \tau_{nmm'} Y_{nmm'}^{kv} + \sum_{l \in N} \sum_{m \in M} r_{lm} A_{lm}^{kv} \right) \quad (4)$$

$\forall k \in K, v \in V$

以上より、OD 間とリンク、ノードの一般化費用の関係は式(5)のように、起点別、時間価値別に定式化される。なお、ここでは旅客が実際の一般化費用よりも多くの費用を支払うことを認め、式(5)は不等号制約としている。

$$\sum_{l \in N} C_{klv} Q_{klv} \geq LC_{kv} + NC_{kv} \quad (5)$$

$\forall k \in K, v \in V$

#### b) リンクサービス維持のための費用

各リンクのサービス維持のための費用は、旅客数に比例して生じる可変費用部分と固定費用部分に分けて考える。本研究では、リンクごとに発生する固定費用  $d_{mij}$  を政府が負担し、旅客 1 人あたりに要する可変費用を旅客が運賃として支払うと仮定する。そのため、本モデルではネットワーク上で発生する可変費用の総和と旅客の支払う運賃の総和が一致することを仮定している。

#### (5) 目的関数

本モデルでは、旅客の消費者余剰の総和からサービス維持のための固定費用の総和を差し引いた社会的純便益 NB を目的関数として用いる。なお、旅客の支払う運賃の総和が事業者の運営費用の総和と一致するため、事業者の利潤を 0 と考えることが出来る。

$$\max_{z, x, Y, A, B, C, Q} NB = \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{v \in V} C S_{klv} - \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{mij} Z_{mij} \quad (6)$$

#### (6) 交通量保存則と変数の定義域

着ノード  $n$  における到着交通量について、以下の 2 式が成立する。

$$\sum_{i \in N} X_{min}^{kv} = A_{nm}^{kv} + \sum_{m' \in M} Y_{nmm'}^{kv} \quad (7)$$

$\forall m \in M, k \in K, n \in N, v \in V$

$$\sum_{m \in M} A_{nm}^{kv} = Q_{knv} \quad (8)$$

$$\forall k \in K, n \in N, v \in V$$

式(7)は着ノード  $n$  に到着した旅客が、そのノードを目的地とする旅客とそのノードで乗り継ぎを行い次のノードに向けて出発する旅客に分かれることを示している。式(8)は各モードで目的地に到着した起点別交通量の和が、OD 交通量に等しいことを表している。

同様に、発ノード  $n$  から出発する交通量について、以下の 2 式が成立する。

$$B_m^{nv} + \sum_{m' \in M} Y_{nmm'}^{kv} = \sum_{j \in N} X_{mnj}^{kv} \quad (9)$$

$\forall m \in M, k \in K, n \in N, v \in V$

$$\sum_{l \in N} Q_{nlv} = \sum_{m \in M} B_m^{nv} \quad (10)$$

$\forall n \in N, v \in V$

式(9)は発ノード  $n$  を出発地としてモード  $m$  に乗車する旅客とそのノードでモード  $m$  に乗り継いだ旅客の和が、その発ノードからの交通量に等しいことを表している。式(10)はそのノードを出発地とする OD 交通量の和が、いずれかのモードを用いて出発することを示している。

また、リンクサービスが成立するための条件として、以下の 2 式を考える。

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} X_{mij}^{kv} \leq g_{mij} Z_{mij} \quad (11)$$

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

$$Z_{mij} = Z_{mji} \quad \forall m \in M, i \in N, j \in N \quad (12)$$

式(11)はリンク交通量が外生的に与えたリンク容量  $g_{mij}$  の範囲内に収まることを示している。式(12)はリンクサービスが双方向同時に設定されることを表している。

最後に、式(13)のように各操作変数の定義域を与える。

$$X_{mij}^{kv} \geq 0, Y_{mm'n}^{kv} \geq 0, A_{mn}^{kv} \geq 0, B_m^{kv} \geq 0 \quad (13)$$

$C_{klv} \geq 0, Q_{klv} \geq 0, Z_{mij} \in \{0, 1\}$

#### (7) 解法

本モデルでは、式(2)や式(5)を求める際に異なる操作変数どうしの積の項を含む二次計画問題となっている。そこで本節では若干の式変形を施し、各制約を凸制約として解くための解法を示す。

まず、式(5)に式(1)を代入して凸二次制約として計算する。計算式は式(14)の通りであるが、代入により現れる  $Q_{klv} \cdot Q_{klv}$  という項に対して、式(15)を満たす  $QQ_{klv}$  を新たに定義している。結果として、式(14)は線形制約、式(15)は凸二次制約となっている。

$$\sum_{l \in K} (C_{klv}^{max} Q_{klv} - \beta_{klv} QQ_{klv}) \geq LC_{kv} + NC_{kv} \quad (14)$$

$\forall k \in K, v \in V$

$$QQ_{klv} \geq Q_{klv} Q_{klv} \quad (15)$$

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

また、式(2)に式(1)を代入することで式(16)を得る。このとき、各 OD 間の消費者余剰は当該 OD 交通量の 2 乗

に比例することがわかる。

$$CS_{klv} = \frac{1}{2} \beta_{klv} Q_{klv} Q_{klv} \quad \forall k \in K, l \in N, v \in V \quad (16)$$

本モデルでは、式(15)で定義した  $QQ_{klv}$  を利用することで、式(16)の消費者余剰を式(17)のように線形式で求める。

$$CS_{klv} = \frac{1}{2} \beta_{klv} QQ_{klv} \quad \forall k \in K, l \in N, v \in V \quad (17)$$

以上より、本モデルは凸二次制約を含む混合整数計画問題として定式化される。実際の計算では Gurobi Optimizer 7.5.1 を用いた。

#### 4. 質的・量的縮小過程の分析方法

需要の量的な減少は、事業者の収入の減少を通して路線の廃止を招き、利用者がより一般化費用のかかる経路での移動を強いられる。その結果、都市間の移動にかかる一般化費用の増加という質的な低下が発生し、それがさらなる需要の量的な減少へとつながる。本章では、このような需要の量的な減少が質的な低下をもたらすプロセスを、消費者余剰を用いて分析する方法を提案する。

本研究では、人口規模の縮小を原因とする需要減少を想定し、図2のように、需要曲線を支払意志額の最大値  $c_{klv}^{max}$  を一定に保ったまま、上限交通量  $q_{klv}^{max}$  を左へシフトしていくことで表現する。このとき、需要減少下でも旅客の利用経路に違いが無ければ、一般化費用は変化せず消費者余剰は上限交通量の減少率に比例して連続的に小さくなる(図2での薄い橙から橙への変化)。しかし、それまで利用していたリンクの一部が設定されなくなると、より一般化費用の大きな経路を利用する必要が生じ、消費者余剰も不連続に小さくなる(図2での赤い矢印で示す一般化費用の上昇と、消費者余剰の橙から茶色への変化)。このような不連続な現象がどこで起きるのかを旅客の時間価値ごとに確認し、需要の量的な変化が質にもたらす影響の度合いを分析する。なお、本研究では全ての OD 間の上限交通量を同一の割合で小さくしていく。

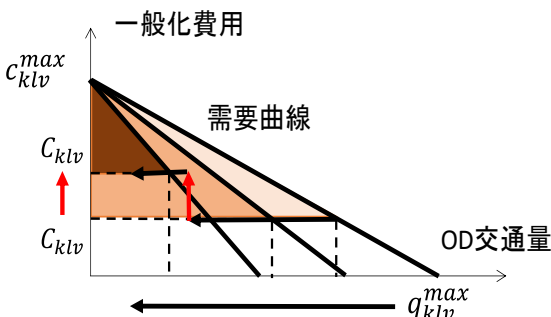


図2 上限交通量を減少に伴う消費者余剰の減少

#### 5. 仮想ネットワークの分析例

##### (1) 数値設定

本研究では、図3で示すような航空、新幹線、在来線、バスで構成された仮想ネットワークを考える。全てのノードに空港が存在し、本研究では任意の2地点間で航空リンクを設定可能とする。

隣接する2地点間はどこでも距離が等しいとみなし、リンクの固定費用、可変費用(運賃)、所要時間は、表1のようにリンクによらずモードごとに値を与える。ただし航空のみ、所要時間は表2のようにリンクごとに異なる値を与えている。モード間の乗継時間は全ノードで共通して表3の値を与える。アクセス時間、イグレス時間もノードによらず表4のようにモードごとに値を与える。また、本研究では縮小過程を分析する上で混雑は考慮しないものとして、旅客容量は十分に大きな値としている。

本研究では時間価値0.45万円/hourの旅客と、時間価値0.15万円/hourの旅客を設定する。以後、前者を時間重視型、後者を運賃重視型と呼ぶ。時間価値に関しては加藤ら<sup>9)</sup>を参考にして設定した。各 OD 間での上限交通量は時間価値別に与えるが、上限交通量は時間価値によらず等しいとしてそれぞれ表5の値で与える。一般化費用の最大の支払意志額は、時間価値に応じてそれぞれ表6、表7の通りである。

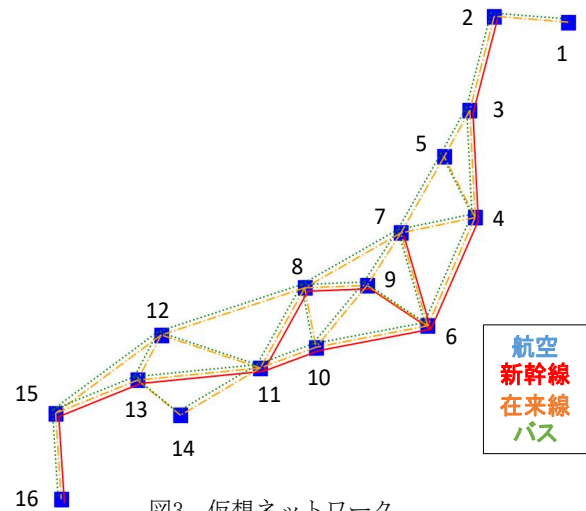


図3 仮想ネットワーク  
※任意の2地点間で航空リンクの設定が可能

表1 リンクに関するパラメータ

	固定費用(万円/day)	可変費用(万円/人)	所要時間(hour)
航空	250	0.8	※
新幹線	1000	0.3	1.5
在来線	500	0.2	3
バス	50	0.1	4.5

※航空の所要時間は表2



表2 航空の所要時間(hour)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2.5	2.5	2.5	3	3
2	1	0	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2.5	2.5	2.5	3	3
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1.5	2	2	2	2.5	2.5
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1.5	2	2	2	2.5	2.5
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1.5	2	2	2	2.5	2.5
6	1.5	1.5	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2
7	1.5	1.5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2
8	1.5	1.5	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2
9	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2
10	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1.5	1.5	1.5	2	2
11	2	2	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1.5	1.5
12	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1	0	1	1	1	1
13	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	0	1	1	1
14	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0	1	1
15	3	3	2.5	2.5	2.5	2	2	2	2	2	1.5	1	1	1	0	1
16	3	3	2.5	2.5	2.5	2	2	2	2	2	1.5	1	1	1	1	0

表3 乗継時間(hour)

mode	航空	新幹線	在来線	バス
航空	0.5	1.5	1.5	1.5
新幹線	1.5	0.05	0.5	0.5
在来線	1.5	0.5	0.05	0.5
バス	1.5	0.5	0.5	0.05

表4 アクセス, イグレス時間(hour)

	アクセス(hour)	イグレス(hour)
航空	1	1
新幹線	0	0
在来線	0	0
バス	0	0

表5 各時間価値ごとの上限交通量(人/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	合計
1	0	3734	60	52	19	972	26	13	36	68	107	10	27	15	53	20	5192
2	3734	0	290	794	120	8746	99	94	155	1233	1337	92	378	56	710	100	17938
3	60	290	0	2776	279	4522	53	15	105	92	312	34	139	15	186	20	8888
4	52	794	2776	0	1530	11749	333	81	128	626	1320	19	144	27	420	63	20062
5	19	120	279	1530	0	2824	65	22	34	201	160	18	32	17	94	14	5379
6	972	8746	4522	11749	2824	0	11580	3377	15133	29787	32936	1303	9749	1165	13026	2771	149640
7	26	99	53	333	65	11580	0	327	275	456	778	35	126	32	142	126	14453
8	13	94	15	81	22	3377	327	0	51	1309	2222	11	166	17	183	13	7881
9	36	155	105	128	34	15133	275	51	0	1806	594	10	144	20	222	188	18901
10	68	1233	92	626	201	29787	456	1309	1806	0	13763	126	1703	150	2815	524	54659
11	107	1337	312	1320	160	32936	778	2222	594	13763	0	777	5621	843	6339	1325	68434
12	10	92	34	19	18	1303	35	11	10	126	777	0	960	18	235	16	3624
13	27	378	139	144	32	9749	126	166	144	1703	5621	960	0	213	3415	279	23096
14	15	56	15	27	17	1165	32	17	20	150	843	18	213	0	203	13	2774
15	53	710	186	420	94	13026	142	183	222	2815	6339	235	3415	203	0	4442	32485
16	20	100	20	63	14	2771	126	13	188	524	1325	16	279	13	4442	0	9904
合計	5192	17938	8888	20062	5379	149640	14453	7881	18901	54659	68434	3624	23096	2774	32485	9904	443310

表6 時間重視型の支払意志額の最大値(万円/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	3.2	6.5	8.5	8.2	9.7	11.2	12.3	10.7	11.3	12.0	14.1	13.1	14.3	14.0	16.3
2	3.2	0	4.2	6.2	6.0	7.5	9.0	10.1	8.5	9.1	9.8	11.9	10.9	12.1	11.7	14.1
3	6.5	4.2	0	2.9	2.1	4.3	4.5	6.9	5.3	5.9	6.6	8.7	7.7	8.9	8.5	10.9
4	8.5	6.2	2.9	0	2.5	2.5	4.1	5.2	3.5	4.2	4.9	7.0	6.0	7.2	6.9	9.2
5	8.2	6.0	2.1	2.5	0	4.0	3.0	5.4	4.9	5.6	6.3	8.4	7.4	8.6	8.3	10.6
6	9.7	7.5	4.3	2.5	4.0	0	2.8	4.2	2.2	2.4	3.3	5.4	4.4	5.5	5.3	7.6
7	11.2	9.0	4.5	4.1	3.0	2.8	0	3.1	3.0	4.5	5.2	7.3	6.3	7.5	7.2	9.5
8	12.3	10.1	6.9	5.2	5.4	4.2	3.1	0	2.9	2.5	2.5	5.1	4.0	5.3	4.9	7.2
9	10.7	8.5	5.3	3.5	4.9	2.2	3.0	2.9	0	2.6	3.7	6.1	4.9	6.2	5.8	8.1
10	11.3	9.1	5.9	4.2	5.6	2.4	4.5	2.5	2.6	0	1.6	4.0	3.0	4.2	3.9	6.2
11	12.0	9.8	6.6	4.9	6.3	3.3	5.2	2.5	3.7	1.6	0	3.3	2.3	3.4	3.3	5.6
12	14.1	11.9	8.7	7.0	8.4	5.4	7.3	5.1	6.1	4.0	3.3	0	3.1	4.3	3.5	6.0
13	13.1	10.9	7.7	6.0	7.4	4.4	6.3	4.0	4.9	3.0	2.3	3.1	0	3.3	1.9	4.4
14	14.3	12.1	8.9	7.2	8.6	5.5	7.5	5.3	6.2	4.2	3.4	4.3	3.3	0	4.4	6.7
15	14.0	11.7	8.5	6.9	8.3	5.3	7.2	4.9	5.8	3.9	3.3	3.5	1.9	4.4	0	2.9
16	16.3	14.1	10.9	9.2	10.6	7.6	9.5	7.2	8.1	6.2	5.6	6.0	4.4	6.7	2.9	0

表7 運賃重視型の支払意志額の最大値(万円/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	1.7	3.5	4.4	4.2	5.1	6.1	6.6	5.7	6.2	6.6	7.6	7.2	7.7	7.7	8.9
2	1.7	0	2.4	3.4	3.1	4.1	5.0	5.5	4.7	5.1	5.5	6.5	6.1	6.6	6.7	7.9
3	3.5	2.4	0	1.8	1.1	2.6	2.2	4.0	3.2	3.7	4.1	5.1	4.7	5.2	5.2	6.4
4	4.4	3.4	1.8	0	1.6	1.6	2.7	3.2	2.3	2.8	3.2	4.2	3.8	4.3	4.3	5.6
5	4.2	3.1	1.1	1.6	0	2.5	1.5	2.9	3.1	3.6	4.0	5.0	4.6	5.1	5.1	6.3
6	5.1	4.1	2.6	1.6	2.5	0	1.7	2.5	1.3	1.6	2.1	3.2	2.8	3.2	3.3	4.5
7	6.1	5.0	2.2	2.7	1.5	1.7	0	1.7	1.9	2.9	3.3	4.3	3.9	4.4	4.4	5.7
8	6.6	5.5	4.0	3.2	2.9	2.5	1.7	0	1.5	1.4	1.4	2.9	2.5	3.0	2.9	4.2
9	5.7	4.7	3.2	2.3	3.1	1.3	1.9	1.5	0	1.4	2.1	3.4	2.9	3.5	3.4	4.6
10	6.2	5.1	3.7	2.8	3.6	1.6	2.9	1.4	1.4	0	1.1	2.4	2.0	2.5	2.6	3.8
11	6.6	5.5	4.1	3.2	4.0	2.1	3.3	1.4	2.1	1.1	0	1.9	1.6	1.9	2.2	3.4
12	7.6	6.5	5.1	4.2	5.0	3.2	4.3	2.9	3.4	2.4	1.9	0	1.8	2.3	2.0	3.3
13	7.2	6.1	4.7	3.8	4.6	2.8	3.9	2.5	2.9	2.0	1.6	1.8	0	1.9	1.3	2.7
14	7.7	6.6	5.2	4.3	5.1	3.2	4.4	3.0	3.5	2.5	1.9	2.3	1.9	0	2.6	3.8
15	7.7	6.7	5.2	4.3	5.1	3.3	4.4	2.9	3.4	2.6	2.2	2.0	1.3	2.6	0	1.7
16	8.9	7.9	6.4	5.6	6.3	4.5	5.7	4.2	4.6	3.8	3.4	3.3	2.7	3.8	1.7	0

(2) 最適ネットワーク形状

(1)での設定(以後、初期設定)における、社会的純便益を最大とするようなネットワーク形状は図4のようになった。

陸路について図3と比較すると、新幹線や在来線が設定されたリンクではバスは設定されていないことがわかる。また、航空ではノード6のように複数のノードへ直通便が設定されるノードがある一方で、ノード8やノード9など、航空リンクが設定されていないノードも存在している。さらに、航空と新幹線を比較すると、航空リンクは新幹線で2ノード以上の距離の移動を要する都市間のみ設定されており、遠距離の航空と中短距離での新幹線という役割分担がなされていることがわかる。

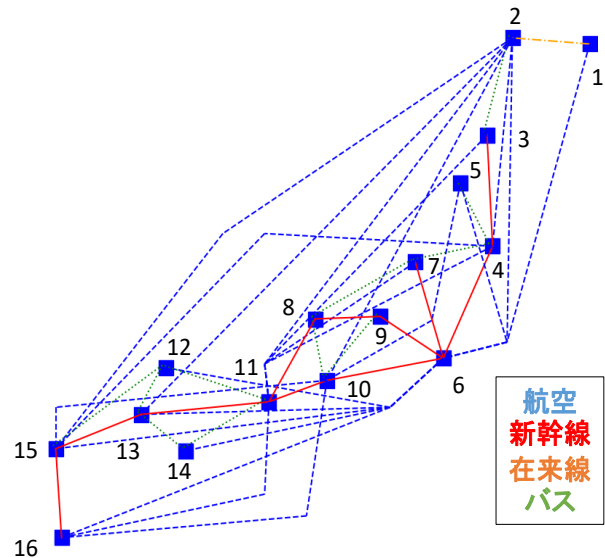


図4 初期設定での最適ネットワーク形状

(3) 消費者余剰の減少プロセス

図5は、各上限交通量を初期設定の状態から5%ずつ、50%まで減少させたときの消費者余剰の値の推移を積み上げ図で示している。総消費者余剰は初期設定では42億432万円/dayだったのに対して、上限交通量を50%減とした場合、20億5123万円/day(51.2%減)となっている。この1.2%という減少率の差は、需要の量的な変化に起因する質的な低下の影響を示している。また、需要を50%減としたときの消費者余剰の減少の割合を時間価値別に見ると、運賃重視型の旅客は17億9611万円/dayから8億8029万円/dayと49.0%に減少している。一方で、時間重視型の旅客は24億0821万円/dayから11億7094万円/dayと48.6%に減少している。時間価値の大きい時間重視型の旅客の方が、減少率が大きく現れることがわかる。

図6は上限交通量を初期設定の状態から減少させたときの総固定費用の推移を各モードの固定費用の積み上げ図で示している。総固定費用の値に変化が生じることは、

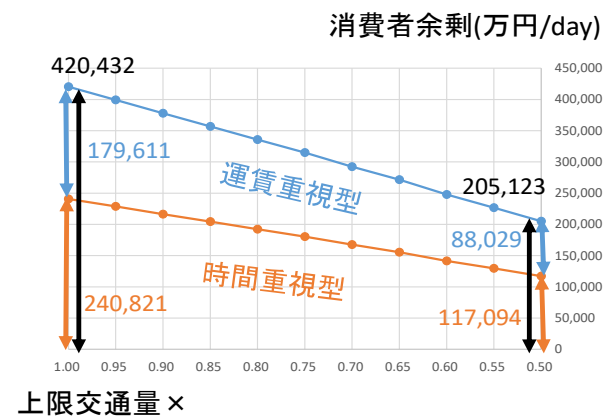


図5 消費者余剰の推移

最適なネットワーク形状も変わることを意味し、一部の旅客で需要における質的な低下が生じている可能性がある。図6では、上限交通量が初期設定の0.9倍となったところで総固定費用が低下し、続いて0.7倍でやや大きく低下、さらに0.6倍のところで大きく低下している。0.6倍以下では、総固定費用が低下し続けている。

ネットワーク形状が変わることで、時間重視型と運賃

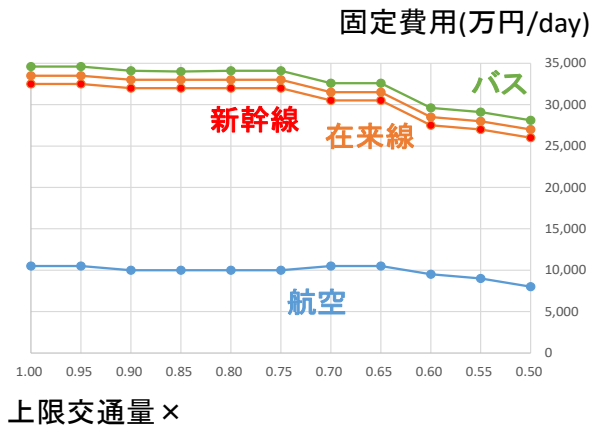


図6 固定費用の推移

重視型の消費者余剰がどのように変化しているのかを表 8 で確認する. 表 8 は上限交通量を減少させた場合の時間重視型と運賃重視型の消費者余剰をそれぞれ初期状態に対する割合で示したものである. 上限交通量を 0.9 倍にしたところで, 各消費者余剰は上限交通量以上の減少を示している. 上限交通量を 0.6 倍まで減少させると, 時間重視型では初期状態に対して 0.588 倍, 運賃重視型では 0.591 倍となり, これ以降, 時間重視型と運賃重視型で消費者余剰の減少率に差が出てきている.

## 5. おわりに

本研究では, 最適な都市間交通ネットワーク形状を求める既存の MNP モデルを複数の時間価値の需要を内生化する形に拡張した. 需要の量的な減少に伴う質的な低下のプロセスを消費者余剰を通して分析する方法を述べた後, 航空, 新幹線, 在来線, バスで構成された仮想ネットワークに対して本モデルを適用し, その傾向を分析した.

結果として, 遠距離では航空, 中短距離では鉄道といったネットワーク上での各モードの役割分担を確認することが出来た. また, 需要の量的な減少に伴う質的な低下のプロセスを時間価値ごとに求めた消費者余剰を通して分析した. 結果として, 上限交通量の減少率を上回る消費者余剰の減少によって, 需要の量的な減少に伴う質的な低下を確認出来た. また, 時間価値の高い旅客の消費者余剰の減少率が大きくなる可能性が示された.

今後, 本モデルで得られる結果についてより細かく分析し, 発表会時に報告する.

表8 初期設定に対する消費者余剰の割合

上限交通量 ×	時間重視型 消費者余剰 ×	運賃重視型 消費者余剰 ×
1.00	1.000	1.000
0.95	0.950	0.950
0.90	0.899	0.899
0.85	0.849	0.848
0.80	0.799	0.799
0.75	0.749	0.749
0.70	0.696	0.696
0.65	0.646	0.646
0.60	0.588	0.591
0.55	0.538	0.541
0.50	0.486	0.490

## 参考文献

- 1) Okumura, M., Tirtom, F., 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.
- 2) 栢元淳平, 塚井誠人, 奥村誠: 複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークの評価, *土木計画学研究・論文集*, No.20, pp.255-260, 2003.
- 3) 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.
- 4) 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*, Vol.72, No.5, pp.903-916, 2016.
- 5) 波床正敏, 中川大: 高速鉄道網の最適化計算結果に基づく国鉄解体後の幹線鉄道政策に関する事後考察, *土木学会論文集 D3*, Vol.71, No.5, pp.629-641, 2015.
- 6) Tirtom Huseyin, 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*, Vol.70, No.5, pp.819-827, 2014.
- 7) Kawasaki, A.: Network Effects, heterogeneous time value and network formation in the airline market, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.38, No.4, pp.388-403, 2008.
- 8) 山口裕通, 奥村誠, Tirtom Huseyin: 時間価値分布に応じた航空と高速鉄道の最適混合ネットワーク形状, *土木計画学研究・講演集*, Vol.50(CD-ROM), 2014.
- 9) 加藤浩徳, 橋元稔典: 我が国の旅客交通時間価値に関するメタ分析, *土木計画学研究・講演集 Vol.38(CD-ROM)*, 2008.

(2018.4.27 受付)

## DEMAND-ENDOGENIZED OPTIMIZATION MODEL FOR MULTI-MODAL NETWORK PLANNING IN INTERCITY TRANSPORTATION

Masataka HOSO and Makoto OKUMURA

Japan has entered an era of declining population, and demand for intercity transportation as a whole is decreasing. The quantitative decrease in demand may result in a qualitative decline in service level for intercity trips. It may lead to further quantitative declines. In order to avoid such a shrinking process, it is important to analyze which link should be critical in the network shrinking process. In this research, we propose a model that extends Multi-Modal Network Planning Model to demand endogenized type and can consider multiple time values. This makes it possible to see the degree of influence that the quantitative decrease in demand brings to quality due to the difference in time value. This paper proposes an analytical method for the quantitative and qualitative network shrinking process based on consumer surplus and shows the applicability through a hypothetical network study.