

# 都市圏郊外部における 多モード公共交通の空間構成最適化モデル

須ヶ間 淳<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 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 S-502)

E-mail: atushi1741@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 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

近年、複数の交通機関を組み合わせ最適に移動サービスを提供する MaaS という概念が脚光を浴びている。その構成要素として、利用者が入力した移動ニーズに合わせて利用可能な経路や交通機関の組み合わせを列挙した上で少数の望ましい選択肢を利用者に示して、選択結果をもとに即座に利用予約・配車及び決済を行うことが必要であるとされ、個別の技術開発が進みつつある。実際にこのようなサービスが事業として成立するためには、需要構造に合わせた適切な交通サービスを支えるインフラを整備することが不可欠である。このとき、多様なニーズに個別に応答するサービスを多用すると提供費用がかさむため、できる限り大量輸送が可能なサービスを活用した規模の経済性を持つシステムを設計することが望ましい。

本研究は、MaaSシステムの空間構成を設計するための最適化モデルを提案する。ここでは OD 需要やサービス料金を内生的に導出するモデルを0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化する。

**Key Words** : *Mobility as a Service, multi-modal, network design, optimization model*

## 1. はじめに

2014年にHeikkilä, S<sup>1)</sup>がMaaS (Mobility as a Service) の枠組みを提案して以来、都市内交通は大きな変革期を迎えている。世界では、Uberや滴滴快車といったモビリティシェアリングサービスが一般化しつつあり、多モードにより構成される交通サービスを一括して提供するwhimやmoovelといった新サービスが生まれている。日本においても、様々な業界を巻き込みながら変革が始まっている<sup>2)</sup>。

これまでの多くのMaaS化では、既存の公共交通ネットワークの存在を前提に、ICTによる交通モード間の連携や、既存交通モードを補完する新モードの導入によるモビリティ・サービス向上が目指されてきた。すなわち、既存アセットを効率的に活用するという、短期的な視点が重視されてきた。

一方で長期的には、MaaS進展下における地域全体のネットワークデザインを考える必要がある。公共交通ネットワークを構成する各交通モードには個別の特徴がある。また、各交通モードの整備費用は大きく、一度整備すれば長期的な利用が想定される。たとえば路線バスであっても、その車両数を頻繁に増減させることは難しい。

そのため、MaaS進展下での各交通モードの最適な空間構成を把握し、長期的な計画の下で各交通モードを配置していくことが重要である。このとき、無限に近い組み合わせが可能な空間構成の設計には、最適性の保証がある数理的なアプローチが有効である。

これまでの公共交通ネットワークに関する研究では、モード間・モード内の乗り換え抵抗が大きいことを前提に、一つのモードの直行便の設定を議論する研究が多かった<sup>3)</sup>。今後 MaaS 化が進展すると、その状況は大きく変わる可能性が高い。ICTの活用等により運行ダイヤの最適化やサービス提供方法の変更が行われ、物理的・心理的な乗り換え抵抗は小さくなるため、乗り換えを許容しても総合的にはより低コストでより高いサービスを楽しむ状況になる。そのため、MaaSの進展に対応したこれまでとは異なる前提条件の下での研究が求められている。

一方、MaaS進展下の公共交通の在り方に関する既往研究のほとんどは、多モードを統合した新サービスの利用意向に関する研究<sup>4)</sup>、モビリティシェアリングサービスが社会に与える影響に関する研究<sup>5)</sup>、あるいは個別技術に関する研究<sup>6)</sup>などである。そこで、本研究では、MaaSの進展に着目した交通ネットワークデザインをタ

ーゲットに、多モードの公共交通の空間的な最適配置を数理的に分析できるモデルを開発した。

本論文の構成は以下の通りである。第 1 章では本研究の背景と目的を述べた。第 2 章で本研究のアプローチの説明を行い、第 3 章でモデルの構築を行う。第 4 章では、仮想空間上での計算例の紹介を行う。第 5 章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

## 2. 本研究のアプローチ

MaaS の概念については、様々な見解がみられるが、本研究では MaaS 化の進んだ状態として以下のような社会を考える。

- ・多モードの公共交通は一体的に管理され、利用者は個別の交通サービスではなく、それらが統合されたモビリティ（移動）・サービスを購入する。
- ・ICTの活用やその他の施策により、モード間の物理的・心理的な乗り換え抵抗は十分に小さい。
- ・サービス料金は、利用する交通モードや経路ではなく、ODペアに応じて設定される。
- ・収受された料金は、適正なネットワーク構造を保つために、各交通モードに最適配分される

上記を念頭に、MaaS が進展した社会における多モード公共交通の最適空間構成を表現できるモデルを構築する。ヨーロッパや日本の現状を鑑みると MaaS 化が今後最も進むのは大都市圏郊外部である可能性が高い。そこで、本研究においても大都市圏郊外部への適用を想定する。

本研究では都市間交通を対象に開発された細・奥村<sup>7)</sup>の MNP (multi-modal network planning) モデルが多モードの最適構成を表現できる点に着目し、それを参考に、市販の最適化ソルバーによる求解が可能な 0-1 変数を含む二次錐制約線形計画問題として最適化モデルを定式化した。

本モデルでは、複数の OD 間の利用者を複数の交通モードで構成されたネットワーク上に配分し、消費者余剰を最大化するようなネットワーク形状を決定する。利用者は一般化費用が最小となる経路・モードを選択し、利用者数が該当経路・モードの容量を超える場合には、改善の経路・モードをも選択すると仮定する。利用者は、利用した経路やモードに依らず、OD ペアごとに内生的に設定されるサービス料金を支払う。複数の経路が用いられる場合には、一般化費用の差異を埋めるように経路間でポイントなどの還元による調整が行われ、どの経路を用いても一定の一般化費用を負担する状況が達成でき

ると仮定する。各リンクに交通モードを設定するためには、固定費用と頻度に応じた可変費用が維持費用として必要となる。OD ペアごとに利用者から収受された利用料金は、地域の公共交通ネットワーク全体の維持費用に充てられる。

個々の利用者の移動ニーズに即してタクシーのような個別のサービスを提供すれば時間費用は小さくなり利便性は高くなるが、交通モードの維持費用も大きくなる。維持費用は料金に跳ね返り、需要を減退させる。従って利便性の指標である消費者余剰を最大化する問題は、利便性とサービスの維持費用とのトレードオフの下で検討する必要がある。本モデルでは、MaaS の進展は、乗り換え抵抗が小さくなることにより表現する。

交通ネットワーク上の利用者行動に関して、個人の選好に着目した交通行動モデルの構築を目指す研究が多数蓄積されてきた<sup>8)</sup>。それらは、交通ネットワークを与件として、1 日や 1 週間といった比較的短い時間スケールの中での利用者の選択行動を分析する際に有用である。他方、本研究はより長期的な視点として、公共交通ネットワークを構成するインフラをどのように整備するかに着目している。そのため、利用者の選好が毎日変動したとしても、平均すれば一般化費用が最小となるルートを選好すると仮定して定式化を行った。

なお、以下の定式化では、大都市圏外部の朝の通勤時間帯の交通を想定し、OD の目的地は都心（に接続する鉄道駅）の 1 箇所であり、多 O1D として起点別に定式化する。

## 3. モデルの定式化

### (1) 集合・変数・パラメータの定義

本モデルで用いる集合、操作変数、外生パラメータをそれぞれ表-1、表-2、表-3 に示す。

表-1 集合とその意味

変数	意味
$N$	居住地(ノード)集合
$D$	目的地ノード
$L$	リンク集合
$L_n^{dep}$	ノード $n$ から発するリンク集合
$L_n^{arv}$	ノード $n$ に着するリンク集合
$M$	モード集合

表-2 操作変数とその意味

変数	意味
$cs_k$	起点 $k$ 別の消費者余剰の総額
$c_k$	起点 $k$ 別の一般化費用の平均値
$q_k$	起点 $k$ 別のOD交通量
$x_l^{k,m}$	モード $m$ 別 起点 $k$ 別のリンク交通量
$y_n^{k,m,m'}$	モード $m$ 別 起点 $k$ 別のリンク交通量 ノード $n$ でモード $m$ から $m'$ に変更する 起点 $k$ 別交通量
$f_l^m$	リンク $l$ でのモード $m$ の便数
$z_l^m$	リンク $l$ でのモード $m$ の有無を示す 0-1 変数
$p_k$	サービス維持に必要な総費用の 起点 $k$ 別の負担配分額
$q_k^{sq.}$	定式化に必要な内生変数

表-3 外生パラメータとその意味

変数	意味
$C_k$	起点 $k$ 別の利用者の最大支払意思額
$Q_k$	起点 $k$ 別の利用者の最大需要
$A_k$	起点 $k$ 別の逆需要関数の傾き
$F_l^m$	リンク $l$ でのモード $m$ の最大便数
$H_m$	モード $m$ の1便あたりの輸送容量
$\theta$	時間価値
$T_l^m$	リンク $ij$ でのモード $m$ の所要時間
$S_n^{mm'}$	ノード $n$ でのモード $m$ から $m'$ への 乗り換え抵抗 (MaaS - parameter)
$V_l^m$	リンク $l$ でモード $m$ を運営するための 固定費用
$W_l^m$	リンク $l$ でモード $m$ を運行するための 運行頻度に比例する単位可変費用

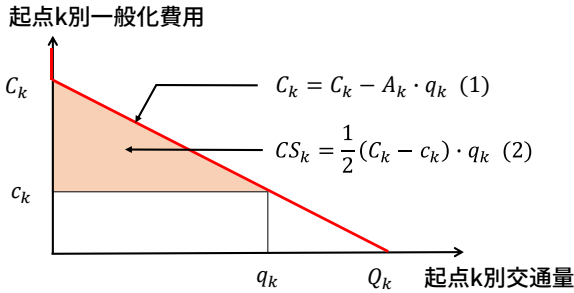


図-1 起点  $k$  別の逆需要関数と消費者余剰

別の消費者余剰  $cs_k$  は式 (2) のように二次式で表せる。起点別消費者余剰  $cs_k$  を全ての起点について足し合わせた総消費者余剰は、対象地域全体の移動利便性を表す指標として用いることができる。そこで、本モデルではこの総消費者余剰を目的関数として最大化する。

$$c_k = C_k - A_k \cdot q_k \quad \forall k \in N \quad (1)$$

$$cs_k = \frac{1}{2} (C_k - c_k) q_k \quad \forall k \in N \quad (2)$$

$$\max_{x,y,c,q,CS,f,z,p} \sum_{k \in N} cs_k \quad (3)$$

### b) 交通量保存則

式(4)は、途中のノード  $n$  において起点  $k$  別の利用者がモード  $m$  で到着し、モード  $m'$  に乗り継ぐこと、式 (5) は途中のノード  $n$  において起点  $k$  別の利用者がモード  $m'$  からモード  $m$  に乗り継ぎ、そのモードでノード  $n$  から出発することを表す。ただし、式 (4) (5) 共にモード  $m = m'$  の場合を許容しており、乗り換えずにノード  $n$  を通過することを表す。また式 (6) は出発地ノードにおける制約、式 (7) は目的地ノードにおける制約である。

$$\sum_{l \in L_n^{arr}} x_l^{k,m} = \sum_{m' \in M} y_n^{k,m,m'} \quad (4)$$

$$\sum_{m' \in M} y_n^{k,m',m} = \sum_{l \in L_n^{dep}} x_l^{k,m} \quad (5)$$

$$\forall k \in N, n \in \{N | n \neq k\}, m \in M$$

$$\sum_{l \in L_k^{dep}} \sum_{m \in M} x_l^{k,m} = q_k \quad (6)$$

$$\forall k \in N$$

$$\sum_{l \in L_D^{arr}} \sum_{m \in M} x_l^{k,m} = q_k \quad (7)$$

### c) リンクサービス設定のための制約

リンクに交通サービスが設定されている場合は、最大便数以下の任意の便数を設定できることを式 (8) で表す。リンク交通量は便数に応じた輸送容量以下となることを式 (9) で表す。また、各リンクのサービスの存在と便数は、双方向で等しいことを式 (10) (11) で表す。

$$f_l^m \leq F_l^m \cdot z_l^m \quad \forall l \in L, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{k \in N} x_l^{k,m} \leq H_m \cdot f_l^m \quad (9)$$

$$z_l^m = z_{l'}^m \quad (10)$$

$$\forall l, l' \in \{L | l \& l' \text{ are pair}\}, m \in M$$

$$f_l^m = f_{l'}^m \quad (11)$$

全リンクのうち、交通サービスが設定された区間には固定費用及び頻度に応じた単位可変費用費用が必要となる。これらを、全ての利用者から集めた料金によって賄う条件として、式(12)を設定する。さらに、起点別の一般化費用の総和を式(13)のように設定する。

$$\sum_{k \in N} p_k = \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} (V_l^m \cdot z_l^m + W_l^m \cdot f_l^m) \quad (12)$$

$$c_k \cdot q_k = p_k + \theta \left( \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} T_l^m \cdot x_l^{k,m} + \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \sum_{n \in N} S_n^{m,m'} \cdot y_n^{k,m,m'} \right) \quad (13)$$

$$\forall k \in N$$

d) 非負制約

各操作変数の定義域は以下のように定める。

$$\begin{aligned} z_l^m \in \{0,1\}, \\ cS_k, c_k, q_k, x_l^{k,m}, y_n^{k,m,m'}, f_l^m, z_l^m, p_k \geq 0 \\ \forall k, n \in N, l \in L, m, m' \in M \end{aligned} \quad (14)$$

(3) 二次錐制約問題への変形

前節での定式化に存在する非線形制約を線形制約または凸二次錐制約に変形する。

式(2), 式(13)による非線形制約を凸二次錐制約に変形する。逆需要関数である式(1)を式(2), 式(13)に代入して変数 $c_{kl}$ を消去し, 式(15), 式(16)のように変形する。

$$cS_k = \frac{1}{2}(C_k - c_k) \cdot q_k = \frac{1}{2}A_k \cdot (q_k)^2 \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$c_k \cdot q_k = C_k \cdot q_k - A_k \cdot (q_k)^2 \geq (\text{式(13)右辺}) \quad \forall k \in K \quad (16)$$

ここで, 凸二次制約である式(17)を満たすように新たな変数 $q_k^{sq}$ を定義し, 式(15)と式(16)をそれぞれ式(18), 式(19)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。

$$q_k^{sq} \geq (q_k)^2 \quad \forall k \in K \quad (17)$$

$$cS_k = \frac{1}{2}A_k \cdot q_k^{sq} \quad \forall k \in K \quad (18)$$

$$C_k \cdot q_k - A_k \cdot q_k^{sq} \geq (\text{式(13)右辺}) \quad \forall k \in K \quad (19)$$

式(2)(18)から, 目的関数の最大化のためには $q_k^{sq}$ を最大化することが望ましい。式(17)は $q_k^{sq}$ の下限のみしか与えないが, 式(19)より $q_k^{sq}$ に上限が与えられるため, 式(17), (19)は実際には等式として成立する。操作変数の定義域は以下ようになる。

$$\begin{aligned} z_l^m \in \{0,1\}, \\ cS_k, q_k, x_l^{k,m}, y_n^{k,m,m'}, f_l^m, z_l^m, p_k, q_k^{sq} \geq 0 \\ \forall k, n \in N, l \in L, m, m' \in M \end{aligned} \quad (20)$$

(4) 定式化のまとめ

最終的に本モデルは, 式(3)を目的関数, 式(4)~式(12), (17)~式(20)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。本モデルは0-1変数を含む二次錐制約付き線形計画問題として定式化されており, 商用最適化ソルバーによる求解が可能である。本研究では, Gurobi Optimizer 8.1を用いて計算を行った。

4. 仮想空間上の計算例

(1) 対象地域・外生パラメータの設定

モデルの適用地域として, 図-2に示すような離散的な仮想空間を用意した。この空間は, 大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模している。各ノードは居住地を表し, それぞ

れに人口が設定されている。図-2ではノードの大きさで人口の多寡を表している。ノード間距離は500mであり, 全体で2km四方の空間を表現している。図-2中央下端のひし形は, 都心に接続する鉄道駅の位置である。以下の計算例では, 朝ラッシュ時のある1時間の交通を想定し, 各ノードの居住者は都心に接続する鉄道駅に移動する。

仮想空間内の交通サービスは, 路線バス, タクシーの2モードによって構成される。各モードには, 最大運行頻度と1台当たりの最大定員が設定されており, またそれぞれ異なる維持費用が設定されている。OD間の需要は弾力的であり, 線形の需要関数で与えた。

本研究では, 人口の多寡とMaaSの進展具合をそれぞれP-para, S-paraというパラメータの大小で表現した。P-paraは0.05から1.0まで動かし, 小さいときに人口が少ないことを表す。S-paraは0.01または1.0を採り, 小さいときに乗り換え抵抗が小さいこと, すなわちMaaSが進展していることを表す。これらのパラメータは外生パラメータの値を設定する際に使用する。それぞれの状況における交通モードの最適空間構成を計算した。

各外生パラメータは実社会を参考に以下のように設定した。C<sub>k</sub>は, 起点k別の利用者の一般化費用に関する最大支払意思額を示す。2km四方と対象地域が狭いことから, 簡単のため, 居住地点によらず一定の最大支払意思額を設定した。

$$C_k = 4000[\text{円}]$$

Q<sub>k</sub>は, 起点k別の利用者の最大需要, すなわち各ノードに居住する人口を示す。以下の式に基づいて, 図-2左方及び下方ほど人口が多い設定とした。P-paraを動かすことで人口の多寡を表現できる。

$$\begin{aligned} Q_k = 400[\text{人}] \times (\text{右端からの距離}[\text{km}] + 0.5[\text{km}]) / 2.5[\text{km}] \\ \times (\text{上端からの距離}[\text{km}] + 0.5[\text{km}]) / 2.5[\text{km}] \\ \times \text{P-para} \end{aligned}$$

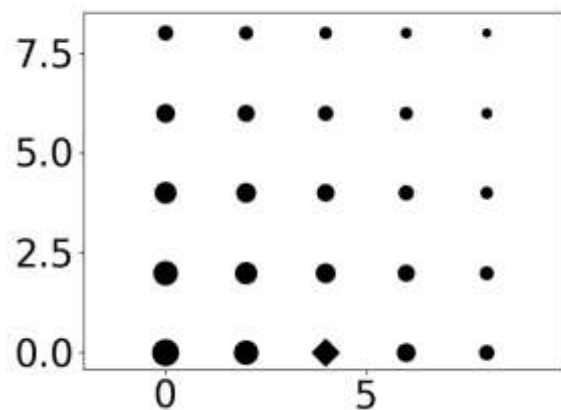


図-2 仮想空間における人口分布 (P<sub>para</sub> = 1)



$A_k$ は逆需要関数の傾きであり、以下の式で表される。

$$A_k = C_k / Q_k \text{ [円/人]}$$

$F_l^m$ はリンク $l$ でのモード $m$ の1時間当たりの最大可能便数を示す。交通モードによらず一定値を採ると仮定して、以下のように設定した。

$$F_l^m = 20 \text{ [本/h]}$$

$H_m$ はモード $m$ の1便あたりの輸送容量を示す。交通モード別に、以下のように設定した。

$$\text{路線バス } H_m = 80 \text{ [人/台]}$$

$$\text{タクシー } H_m = 4 \text{ [人/台]}$$

$\theta$ は時間価値を示し、以下のように設定した。

$$\theta = 3000 \text{ [円/時間]}$$

$T_l^m$ は、リンクごとの所要時間を示す。リンク間距離は縦横に結ぶリンクが500 m、斜めに結ぶリンクが $500 \times \sqrt{2}$  mである。また本研究においては、いずれの交通モードも表定速度を15 [km/時]と仮定し、以下のように設定した。

$$T_l^m = \text{リンク距離 [km]} / 15 \text{ [km/h]}$$

$S_n^{mm'}$ は、ノード $n$ でのモード $m$ から $m'$ への乗り換え抵抗を示す。 $m = m'$ の際は、乗り換えずにノード $n$ の通過を意味することに注意して以下のように設定した。 $S$ -paraを動かすことにより、MaaSの進展度合いを表現できる。

$$S_n^{mm'} = \begin{cases} 0 \text{ [h]} & \text{if } m = m' \\ \frac{1}{6} \text{ [h]} \times S\text{-para} & \text{if } m \neq m' \end{cases}$$

$V_l^m$ は、リンク $l$ でモード $m$ を運営するために必要な固定費用を示す。バス停の維持管理費用や非現場業務部門などを想定しており、以下のように設定した。

$$\text{路線バス } V_l^m = 4800 \text{ [円/km]}$$

$$\text{タクシー } V_l^m = 1200 \text{ [円/km]}$$

$W_l^m$ は、リンク $l$ でモード $m$ を運行するための、運行頻度に比例する単位可変費用を表す。リンクに1 [本/h]の乗り物を走らせるために必要な乗り物の台数と、乗り物を1 km走らせるのに必要な費用から、以下のように算出した。

$$\text{路線バス } W_l^m =$$

$$(\text{リンク距離 [km]})^2 / 15 \text{ [km/h]} \times 400 \text{ [円/km]}$$

$$\text{タクシー } W_l^m =$$

$$(\text{リンク距離 [km]})^2 / 15 \text{ [km/h]} \times 300 \text{ [円/km]}$$

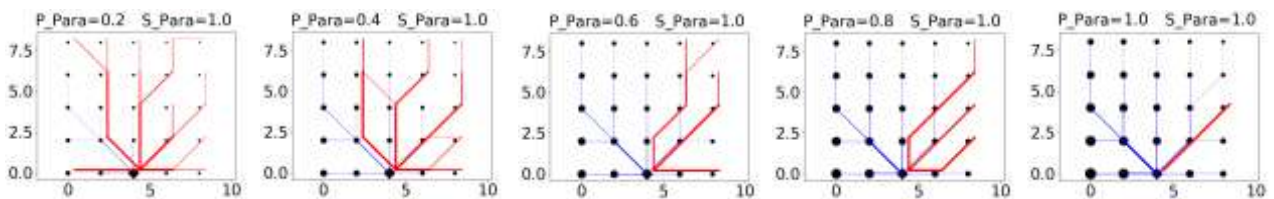
## (2) 結果と考察

図-3は人口の多寡、及びMaaS化の有無に応じた、2つの交通モードの最適空間構成を示す。青線は各リンクに路線バスのサービスが設定されていることを示し、赤線はタクシーのサービスが設定されていることを示す。線の太さは運行頻度の多寡を示す。上段の状態A（現状）は、 $S$ -para=1に固定した際の人口の多寡に応じた空間構成を示す。下段の状態B（MaaS進展後）は、同様に $S$ -para=0.01に固定した際の空間構成を示す。

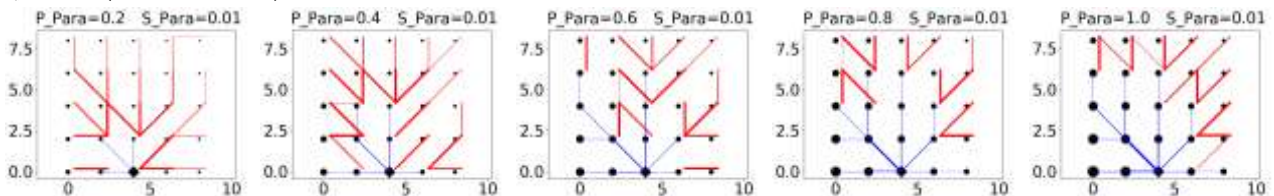
状態A（現状）では、路線バスとタクシーの双方のサービスが鉄道駅に乗り入れており、特に鉄道駅周辺ではリンクが重複している。一方で、状態B（MaaS進展後）では、鉄道駅周辺や人口の多い地域では路線バスのサービスが、鉄道駅から離れ人口が少ない地域ではタクシーのサービスが設定されており、棲み分けがなされている。また交通モード間の乗り換えが活発に行われていることが読みとれる。

MaaS化を進めることで、路線バスのサービスが設定されるリンクが減り、タクシーのサービスが設定される

状態A（現状）



状態B（MaaS進展後）



— 路線バス — タクシー 運行便数 — 20 [本/h] ~ — 1 [本/h]

図-3 公共交通モードの最適空間構成

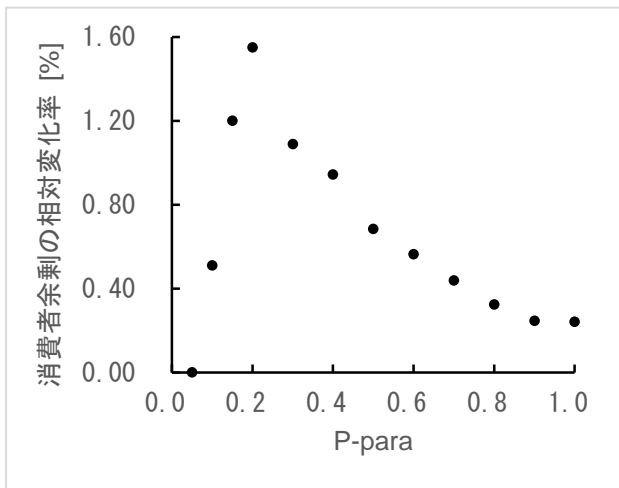


図-4 人口多寡と消費者余剰の相対変化率

リンクが多くなる傾向にあることも分かる。これは、状態A（現状）では、乗り換え抵抗が大きいために、割高な維持費用を負担してでもより広い地域で路線バスを維持しているためと考えられ、MaaSの進展により空間構成が適正化されることを示唆している。

図-4は、地域内の人口の多寡と、MaaS化による状態A（現状）からの消費者余剰の相対変化率、の関係を表している。乗り換え抵抗の値を変化させているため、同じ経路・モードでも状態B（MaaS進展後）の一般化費用は状態A（現状）よりも小さくなり、消費者余剰は大きくなる。しかしながら、図-4に示されたグラフはおおよそ上凸な形状を示しており、乗り換え抵抗の値の削減による直接的な効果だけでなく、波及効果が存在することを示している。これは、リンクの重複の解消や、割高なモードの維持の解消によるものと考えられる。

また、地域内の人口が多すぎても少なすぎてもMaaSの効果が小さくなることが読み取れる。考慮する交通モードの容量等に依存すると考えられるが、適切な人口規模の地域でMaaSを進展させるべきであることを示唆している。

## 5. まとめ

本研究では、大都市圏郊外部におけるMaaSの進展に着目し、その下での多モード公共交通の最適空間構成を数理的に分析するために、数理計画モデルを構築した。そして、本モデルを用いた計算例として、朝ラッシュ時を想定した仮想空間上における計算を行った。それにより以下のような示唆が得られた。

- ・現状では複数モードのサービスが鉄道駅に乗り入れているが、MaaSが進展するとモードごとに棲み分けが

図られる。同一リンクに複数モードが重複設定されにくくなる。

- ・MaaSの進展により、割高な交通モードを広範囲で維持する必要がなくなり、交通モードの空間構成が効率化される。
- ・MaaSの進展は、乗り換え抵抗の削減による直接的な効果だけでなく、上記のような波及効果を生み、消費者余剰の拡大に大きく貢献する。
- ・一方で、MaaSが効果的に作用すると考えられる人口規模は限られており、適用地域には注意が必要である。

ただし、本計算結果は初歩的なものである。今後は本モデルを用いて、様々な条件を変えながら、MaaS進展下での公共交通モードの最適空間構成を分析する必要がある。また、将来的には、モード別に費用負担を行った場合との比較や、人口減少と関連した経時的なネットワークの変化、などを表現できるようなモデルの拡張が望まれる。

## 参考文献

- 1) Heikkilä, S.: Mobility as a Service—A Proposal for Action for the Public Administration Case Helsinki, Aalto University, 2014.
- 2) 日本政策投資銀行：MaaS（Mobility as a Service）の現状と展望～デジタル技術と新たなビジネスモデルによる「移動」の再定義～, [https://www.dbj.jp/ja/topics/report/2018/files/0000032052\\_file2.pdf](https://www.dbj.jp/ja/topics/report/2018/files/0000032052_file2.pdf), 2018 (2019.10.4 参照).
- 3) Anita, S.: Line planning in public transportation: models and methods, *OR Spectrum*, Vol.34, issue 3, pp.491-510, 2012.
- 4) 藤垣洋平, 高見淳史, トロンコソパラディジアンカルロス, 原田 昇：大都市圏向け統合モビリティサービス Metro-MaaS の提案と需要評価, 都市計画論文集, 52 巻 3 号, pp.833-840, 2017.
- 5) 香月 秀仁, 東 達志, 高原 勇, 谷口 守：シェア型自動運転交通"Shared-adas"導入による駐車時空間削減効果, 都市計画論文集, 53 巻 3 号, pp.544-550, 2018.
- 6) 中島 秀之, 野田 五十樹, 松原 仁, 平田 圭二, 田柳 恵美子, 白石 陽, 佐野 渉二, 小柴 等, 金森 亮：バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装, Vol.71, No.5, pp.1\_875-1\_888, 2015.
- 7) 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.1\_779-1\_786, 2018.
- 8) 兵藤哲朗, 室町泰徳：個人選択行動モデルの最近の開発動向に関するレビュー, 土木計画学研究・講演集, No.23 (2) pp.275-278, 2000.

(2019.?? 受付)

## Optimal Spatial Configuration Model of Multi-modal Public Transportation in Suburban Area

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

In recent years, the concept of MaaS, which provides optimal and integrated mobility services by combining multi-modal public transportation, has been highlighted. This concept aims to realize the service to provide a combination of routes and transportation that can be used in accordance with the user's mobility needs, and to make reservations and settlement immediately. In order to establish and sustain such service as a business, it is indispensable to develop and maintain appropriate infrastructures to meet demand from a long-term perspective. It will be expensive to prepare a lot of services that can meet various needs individually. Therefore, it is desirable to design a public transport network with economies of scale using mass transport services as much as possible. In this research, we developed the optimization model, which derives the OD demand and freight rate endogenously, to design the spatial configuration of public transportation required for realizing MaaS. This model is formulated as Second-order cone programming problem including binary variables.