

# 都市圏郊外部における 適切な公共交通網構成の分析

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:mokmr@tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

地域のモビリティ維持は重要な課題である。その際、公共交通の存続が期待されがちだが、モビリティとは本来、自家用車を含む多様なモードで担われるべきものである。交通需要が縮小し、ますます公共交通の経営が厳しくなるなか、需要に見合った適切な規模・構成へと公共交通ネットワークを再編し、効果的に活用すること、その他の地域では自家用車を含む別モードによるモビリティ維持・向上を図ることが必要だろう。本研究では、適切なサービス提供という観点から、サービスの運営費用を運賃で賄うという制約式の下で、社会的総余剰を最大化する公共交通網の構成を求めるモデルを開発した。そして、大都市圏郊外部の適切な公共交通網構成の検討を行った。その際の条件として、路線縮小の許容、設定可能な公共交通モードの種類、乗継抵抗の大小について複数の条件を設定して、達成される社会的余剰の違いを考察した。

**Key Words :** *public transportation, network design, optimization model, suburban area*

## 1. はじめに

公共交通網（鉄道、路線バスなど、以下、NW）の特長は、需要を束ね一括してサービス提供することにより、低廉で便利なモビリティを提供できる点である。その特長を活かすためには束ねられるだけの大きな需要があることが前提となるが、我が国の交通需要は既に減少傾向にあり<sup>1)2)</sup>、公共交通をとりまく経営環境は厳しい。実際に公共交通の廃止が相次ぐ中<sup>3)</sup>で、十分な需要が確保できるのかには疑問がある。

従来、モビリティに関する議論では公共交通網の存廃が注目されがちであった<sup>4)</sup>。しかし、やみくもな公共交通網の維持は必ずしも地域に恩恵をもたらさない。公共交通網の維持には多額の運営費用が必要だが、我が国では受益者負担として運賃収入により賄ってきた。近年は不採算路線も多く<sup>5)</sup>なり、その不足額を他路線利用者からの内部補助や自治体等からの外部補助によって埋め合せている。この補助を行うために、公共がなすべき他の事業への財源が圧迫され、不利益を及ぼすことに注意が必要である。また、本来の目的であるモビリティの確保が、自家用車を含む多様なモードで分担・連携して維持できるのであれば、やみくもに公共交通の存続を目指

す必要はなく、大きな補助に頼ることなく適切な規模の公共交通網を構築すべきである。公共交通サービスの提供が非効率な地域では自家用車を含む非固定路線型の交通モードへ転換することになる。この時、近年はコミュニティバスなど多様な交通モードの普及や、MaaS等による乗り継ぎのシームレス化など、公共交通網の姿そのものも変わりつつあることにも配慮したい。以上のことから、モビリティの確保のため、地域外からの補助を前提としない適切な公共交通網構成の解明が求められる。

本研究では、公共交通サービスの空間的な提供範囲、設定する公共交通モードの種類と空間的な取り合わせ、公共交通モード間の乗り継ぎ抵抗、それら3つの組み合わせを公共交通網構成（以下、NW構成）と定義する。そして地域の社会的総余剰を最大化するようなNW構成を求める数理モデルを開発する。ここでは、多くの人々が都心まで通勤・通学するような大都市圏郊外部の鉄道駅周辺における、居住地から鉄道駅までのフィーダー交通部分を対象にモデルを適用する。様々な条件設定の下で計算を行うことで、採るべき適切なNW構成の特徴を明らかにする。本研究では地域内における路線間の内部補助のみを考慮し、自治体などによる外部補助は想定し

ない。

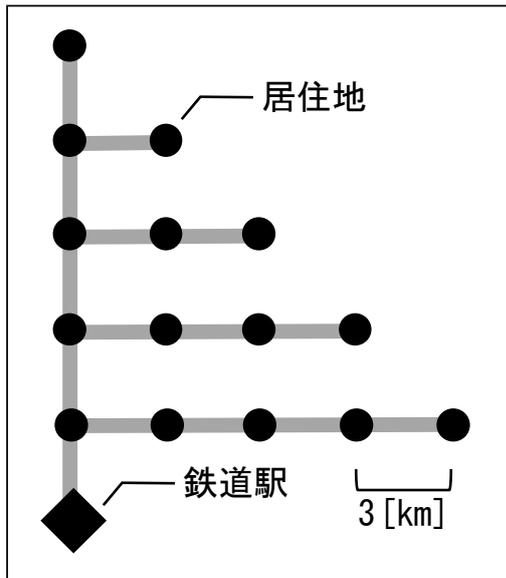


図-1 仮想地域

NW 構成に関する既往研究にはこれまで、モードに着目した研究<sup>9)</sup>や路線形状に着目した研究<sup>10)</sup>、路線の空間的・時間的密度に着目した研究<sup>11)</sup>などが存在するが、それらは全て運営費用の予算や需要を固定的な外生パラメータとして与え、運営費用の最小化や利用者が支払う一般化費用の最小化を考えている。本研究のように、適切なサービス提供という観点から社会的総余剰の最大化を考えた研究は見当たらない。また、1つの地域内における複数モードの分担・連携を考慮した研究も都市内交通分野では見当たらず、本研究の特徴である。

第1章では本研究の背景と特徴を述べた。第2章では本研究で用いるモデルの説明を行う。第3章では第2章で説明したモデルを用い、様々な条件設定の下で計算を行うことで、最適なNW構成の特徴を明らかにする。第4章にはまとめと今後の課題を記す。

## 2. 最適NW構成を求めるモデル

### (1) モデルの概要

都市間交通分野でNW構成を分析するため細・奥村<sup>12)</sup>が開発したMNPモデルを参考に、NW構成を操作変数として社会的総余剰を最大化するモデルを構築した。本研究では、大都市圏郊外部に多く見られる、各居住地から鉄道駅までのフィーダー交通に着目し、モデルを構築していく。仮想地域は鉄道駅から5kmまでの、図-1に示すような地域で、左下のノードは鉄道駅を、それ以外のノードは居住地を表している。ノード間距離は1kmである。本研究では各居住地から鉄道駅への需要が卓越している

との仮定から居住地間の交通需要は無視し、居住地から鉄道駅までの交通需要のみを考える。利用者はまず、公共交通と自家用車のどちらを利用するかを選択する。

公共交通サービスの構成要素として、定員や運営費用の水準が異なる2つのモード（大型交通と小型交通）を考える。それぞれ大型交通は一般的な路線バスを、小型交通は定員10人程度のコミュニティバスを想定した。移動に公共交通を選択した利用者は、途中で複数のサービスを乗り継ぐことは可能であるが、その場合一般化費用には乗継抵抗（本研究では、乗り継ぎに必要な所要時間に乗り継ぎに伴う心理的な抵抗を加えたもの）が加算されるものとする。

公共交通NWの運営費用は車両の走行距離に比例して発生するものとし、NW全体の運営費用を利用者が支払う運賃の総和で一括して賄う。すなわち、必ずしも路線ごとに収支が合うとは限らず、内部補助を行うことを許している。一方で自家用車の一般化費用は、時間的な費用に様々な金銭費用を加えたものであり、利用区間の走行距離に比例すると仮定する。大型交通より小型交通のほうが車両走行距離あたりの単価が小さく、より小さな需要規模でも1人当たりの運営費用を小さくできるため、より需要の小さな状況に適している。

必要な運営費用を運賃収入で確保できない場合、公共交通サービスが提供されない地域が現れる。その場合には、自家用車を利用して鉄道駅まで移動すると考える。

需要は弾力的であり、最大支払い意思額、最大需要規模、及び一般化費用に基づいて、内生的に交通量が決定される。利用者が公共交通NWと自家用車のいずれを利用するのか、また公共交通NW内でいずれのモードを利用するのか、は個々人の便益等に関わらず、地域全体の社会的総余剰を最大化するように決定される。ただし社会的総余剰の大部分が個々人の便益の総和で占められるため、個々人が完全情報下で一般化費用（本研究では、移動に必要な費用+移動時間+乗継抵抗）を最小化する場合と同様の交通手段が選択される。

本研究では4つの観点（(イ)自家用車のみ利用可能な場合・自家用車と公共交通サービス双方を利用可能な場合、(ロ)公共交通NWにおいて路線の一部縮小を許容しない場合・一部縮小を許容する場合、(ハ)公共交通NWに大型交通のみ設定可能な場合・大型交通と小型交通の双方を設定可能な場合、(ニ)公共交通NW内の乗継抵抗が大きい場合・小さい場合）を総当たりに組み合わせ、9通りの条件（自家用車のみ利用可能な場合1通り+公共交通に関する観点(ロ)～(ニ)の2<sup>3</sup>の組み合わせ）を考える。そして、各条件に対して最大需要規模を動かしながら繰り返し計算を行い、その結果を比較分析する。各条件の詳細は、第3章で説明する。

表-1 集合とその意味

変数	意味
$N$	起点ノード集合
$N_l^{up}$	リンク $l$ の上流(駅とは反対の方向)に存在するノード集合
$D$	鉄道駅(終点ノード)集合
$L$	リンク集合
$L_n^{dep}$	ノード $n$ から発するリンク集合
$L_n^{arr}$	ノード $n$ に着するリンク集合
$L_l^{cnt.in}$	リンク $l$ の起点に着するリンク集合
$L_l^{cnt.out}$	リンク $l$ の終点から発するリンク集合
$M$	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
$c_k$	1人当たりの起点 $k$ 別一般化費用
$q_k$	起点 $k$ 別のOD交通量
$x_{k,m,l}^{pub}$	モード $m$ 別起点 $k$ 別のリンク $l$ の公共交通利用の交通量
$y_{k,m,m',n}^{pub}$	ノード $n$ でモード $m$ から $m'$ に乗り継ぐ起点 $k$ 別の公共交通利用の交通量
$z_{m,l}^{pub}$	リンク $l$ でのモード $m$ の有無を示す0-1変数(0:不存在, 1:存在)
$f_{m,l}^{pub}$	リンク $l$ におけるモード $m$ の運行頻度
$f_{m,l}^{pub.pass}$	モード $m$ 別にリンク $l$ の終点から接続するリンクに直通する運行頻度
$s_{m,l}^{pub}$	リンク $l$ の着地における同モード $m$ 間の乗り継ぎの有無を示す0-1変数(0:不存在, 1:存在)
$u_{k,m,l}^{pub}$	リンク $l$ の着地における同モード $m$ 間の乗り継ぎ交通量に応じて発生する乗継抵抗の起点 $k$ 別モード $m$ 別リンク $l$ 別の和
$p_k^{pub}$	公共交通による起点 $k$ から鉄道駅までの移動に必要な費用(=運賃)
$x_k^{car}$	起点 $k$ 別の自家用車利用の交通量
$t_k$	起点 $k$ 別の税収(政府の収入を表す)
$q_k^{sq.}$	二次錐計画問題への変換に必要な変数(起点 $k$ 別のOD交通量 $q_k$ の2乗を表す)

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い意思額
$Q_k$	起点 $k$ 別の利用者の最大需要規模
$A_k$	起点 $k$ 別の逆需要関数の傾き
$F^{pub.max}$	各リンクの公共交通サービスの最大運行頻度(十分に大きな数)
$F^{pub.min}$	各リンクの公共交通サービスの最低運行頻度
$H_m^{pub}$	公共交通モード $m$ の車両容量
$T_{m,l}^{pub}$	リンク $l$ での公共交通モード $m$ の所要時間を表す一般化費用
$S^{pub}$	乗継抵抗を表す一般化費用
$V_{m,l}^{pub}$	公共交通NWの運営に必要な費用(車両走行距離に比例)の単位可変費用
$T_k^{car}$	自家用車を利用した場合の起点 $k$ から鉄道駅までの所要時間を表す一般化費用
$V_k^{car}$	自家用車による起点 $k$ から鉄道駅までの移動に必要な費用(車両走行距離に比例)の単位可変費用

(2)モデルの定式化

a)集合・外生パラメータ・操作変数

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. 特段の記述がない限り表-2中の変数は連続変数である. また本研究で用いるリンクはすべて有向リンクである.

b)目的関数

本研究では, 起点別の逆需要関数を式(1)のような線形式で与える. 図-2に示すように, 起点別の消費者余剰 $cs_k$ は式(2)に示す二次式で表せる. 起点別消費者余剰 $cs_k$ を全起点について足し合わせ, それに政府の起点 $k$ 別の税収 $t_k$ を加えたものを本研究では社会的総余剰と呼ぶこととし, 本モデルの目的関数として最大化する(式(3)).

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

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

$$\max_{cs, c, q, x, y, z, f, f^{pass}, s, u, t, p} \sum_{k \in N} (cs_k + t_k) \quad (3)$$

c)交通量保存則

式(4)は, 起点ノードからの交通が, 公共交通で出発するか, 自家用車で鉄道駅に直接移動することを表している. 式(5)は, 起点ノードからの交通が鉄道駅に到着する際, 公共交通で到着するか, 自家用車で直接起点から到着することを表現している. 公共交通NW内では乗り

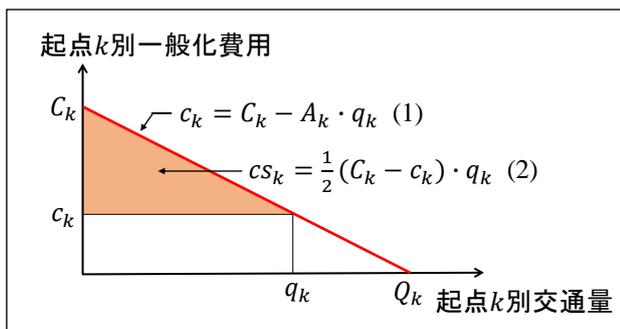


図-2 起点 $k$ 別の逆需要関数と消費者余剰

継ぎを認めるため、交通量保存則を式 (6) (7) のように表現する。式 (6) 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 (7) 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  $m$  でノード  $n$  から出発することを表している。なお上記の公共交通 NW における交通量保存則ではモードを区別して記述しているため、同一リンクに複数のモードを重複して設定することも可能である。また式 (6) (7) は共にモード  $m = m'$  の場合も許容しており、その場合は乗り継がずにノード  $n$  を通過することを表現している。式 (8) (9) は、起点ノードに到着したり、起点ノードで乗り継ぐような不合理な交通が存在しないことを表している。

$$q_k = \sum_{l \in L_k^{dep}} \sum_{m \in M} x_{k,m,l}^{pub} + x_k^{car} \quad (4) \quad \forall k \in N$$

$$\sum_{l \in L_D^{arrv}} \sum_{m \in M} x_{k,m,l}^{pub} + x_k^{car} = q_k \quad (5) \quad \forall k \in N$$

$$\sum_{l \in L_n^{arrv}} x_{k,m,l}^{pub} = \sum_{m' \in M} y_{k,m,m',n}^{pub} \quad (6) \quad \forall k \in N, n \in \{N | n \neq k\}, m \in M$$

$$\sum_{m' \in M} y_{k,m',m,n}^{pub} = \sum_{l \in L_n^{dep}} x_{k,m,l}^{pub} \quad (7) \quad \forall k \in N, n \in \{N | n \neq k\}, m \in M$$

$$\sum_{l \in L_k^{arrv}} \sum_{m \in M} x_{k,m,l}^{pub} = 0 \quad (8) \quad \forall k \in N$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} y_{k,m,m',k}^{pub} = 0 \quad (9) \quad \forall k \in N$$

#### d) 公共交通サービスの運営に関する制約

まず、公共交通サービス維持の条件を記述する制約式を設ける。路線の一部縮小を許容しない場合、式 (10) において、リンクに必ずいずれかの公共交通モードが設定されることを条件とする。路線の一部縮小を許容する場合には式 (10) を削除すれば良い。また、一切の公共交通が存在せず自家用車のみ利用できる場合は式 (10) の左辺を 0 に置き換え、不等号を等号に置き換えれば良い。

$$1 \leq \sum_{m \in M} z_{m,l}^{pub} \quad (10) \quad \forall l \in L$$

式 (11) (12) はリンクに公共交通サービスが運営されている場合 ( $z_{m,l}^{pub} = 1$ ) に、最大運行頻度  $F^{pub,max}$  と最低運行頻度  $F^{pub,min}$  の範囲内で任意の運行頻度を設定できることを表す。式 (13) はリンク交通量が運行頻度と車両容量により制約を受けることを表す。ただし本研究では最大運行頻度  $F^{pub,max}$  を需要に対して十分に大きな値に設定しているため、リンクに公共交通サービスが運

営されている限りは、全ての利用者が任意の公共交通モードを選択できる。

式 (14) (15) は、運行頻度に関する条件付きの保存則である。本モデルで考慮する需要が各ノードから出発し鉄道駅に到着する需要のみであり、交通サービスはすべて鉄道駅に向かうという特徴に着目して定式化した。同モード間の乗り継ぎが行われず ( $s_{m,l}^{pub} = 0$ )、接続先リンクにモード  $m$  が設定されている ( $z_{m,l}^{pub} = 1$ ) 場合、接続元リンクからの直通を保証するため、接続先リンクの運行頻度を、接続元リンクの運行頻度の和以上に設定する必要がある。同モード間の乗り継ぎが行われる場合 ( $s_{m,l}^{pub} = 1$ ) は、接続先リンクの運行頻度を、接続元リンクのうち乗り継ぎが行われるリンクを除くリンクの運行頻度の和以上に設定する必要がある。接続先リンクにモード  $m$  が設定されていない場合 ( $z_{m,l}^{pub} = 0$ ) は式 (11) と合わせて式 (14) (15) の両辺がゼロとなり、制約式は機能しない。式 (16) は接続先リンクに同モードの設定がなければ、同モード間乗り継ぎが行えないことを示している。

$$f_{m,l}^{pub} \leq F^{pub,max} \cdot z_{m,l}^{pub} \quad (11) \quad \forall l \in L, m \in M$$

$$F^{pub,min} \leq f_{m,l}^{pub} \quad (12) \quad \forall l \in L, m \in M$$

$$\sum_{k \in N} x_{k,m,l}^{pub} \leq H_m^{pub} \cdot f_{m,l}^{pub} \quad (13) \quad \forall l \in L, m \in M$$

$$f_{m,l}^{pub} - F^{pub,max} \cdot s_{m,l}^{pub} - F^{pub,max} \cdot (1 - z_{m,l'}^{pub}) \leq f_{m,l}^{pass} \quad (14) \quad \forall l \in L, l' \in L_l^{cnt,out}, m \in M$$

$$\sum_{l' \in L_l^{cnt,in}} f_{m,l'}^{pub,pass} \leq f_{m,l}^{pub} \quad (15) \quad \forall l \in L, m \in M$$

$$s_{m,l}^{pub} \leq z_{m,l}^{pub} \quad (16) \quad \forall l \in L, m \in M$$

#### e) 運営費用の利用者負担に関する制約

交通サービスの運営には車両走行距離 ( $\propto$  運行頻度) に応じた運営費用が必要となる。また移動に際しては移動時間や乗継抵抗も発生する。本モデルでは、移動に必要な費用と所要時間と乗継抵抗の和を一般化費用と考えている。公共交通を利用する場合の移動費用  $p_k^{pub}$  は、地域全体の公共交通サービスの運営に必要な費用の起点別負担配分額であり、内部補助を認めている。運営費用の総額に関する条件を式 (17) のように設定した。一方で、自家用車を利用する場合の移動費用は、自家用車を居住地から鉄道駅まで運転するのに必要な全費用であり、利

用者がそれぞれ負担する。以上を踏まえ、一般化費用の総和の清算条件を起点別に式(18)のように設定する。同モード間の乗継抵抗値を表す $u_{k,m,l}^{pub}$ は式(19)のように設定した。

なお、式(17)(18)からわかるように本研究で明示的に考える運営費用は可変費用部分のみである。しかし公共交通サービスには、式(12)で示した最低運行頻度制約があるため、サービスの設定にあたって一定の費用が固定的に発生することを表現している。

$$\sum_{k \in N} p_k^{pub} \geq \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} (V_{m,l}^{pub} \cdot f_{m,l}^{pub}) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} c_k \cdot q_k - t_k &= p_k^{pub} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} T_{m,l}^{pub} \cdot x_{k,m,l}^{pub} \\ &+ \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} u_{k,m,l}^{pub} \\ &+ \sum_{m \in M} \sum_{m' \in (M|m' \neq m)} \sum_{n \in N} S^{pub} \cdot y_{k,m,m',n}^{pub} \\ &+ (V_k^{car} + T_k^{car}) \cdot x_k^{car} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} S \cdot (y_{k,m,m,n}^{pub} - (1 - s_{m,l}^{pub}) \cdot F^{pub,max} \cdot H_m^{pub}) &\leq u_{k,m,l}^{pub} \\ \forall k \in N, l \in L, m \in M & \\ \forall k \in N_l^{up}, l \in L, m \in M & \\ * n \text{はリンク} l \text{の終点ノード} & \end{aligned} \quad (19)$$

#### f) 非負制約

各操作変数の定義域は以下のように定める。

$$\begin{aligned} z_{m,l}^{pub}, s_{m,l}^{pub} &\in \{0,1\}, \\ CS_k, C_k, Q_k, x_{k,m,l}^{pub}, y_{k,m,m',n}^{pub}, f_{m,l}^{pub}, f_{m,l}^{pub,pass}, \\ u_{k,m,l}^{pub}, p_k^{pub}, x_k^{car}, t_k &\geq 0 \\ \forall k, n \in N, l \in L, m, m' \in M & \end{aligned} \quad (20)$$

#### g) 二次錐計画問題への変形

前節での定式化における非線形制約(式(2)(17))を、線形制約または凸二次錐制約に変形する。式(2)(17)(20)に式(1)を代入して変数 $c_k$ を消去する。式(2)についてはさらに両辺に $t_k$ を加え、式(18)を代入した。なお式(20)へ式(2)を代入する際には、 $C_k/Q_k = A_k$ であることに注意する。以上の操作結果を式(21)(22)(23)に示す。

$$\begin{aligned} CS_k + t_k \\ (= C_k \cdot q_k - \frac{1}{2}(C_k - c_k) \cdot q_k - (c_k \cdot q_k - t_k)) \\ = C_k \cdot q_k - \frac{1}{2} A_k \cdot (q_k)^2 - (\text{式(18)右辺}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\forall k \in N$$

$$C_k \cdot q_k - A_k \cdot (q_k)^2 = (\text{式(18)右辺}) \quad (22)$$

$$\forall k \in N$$

$$q_k \leq Q_k \quad (23)$$

$$\forall k \in N$$

ここで、凸二次制約である式(24)を満たすように新た

な変数 $q_k^{sq}$ を定義し、式(21)(22)をそれぞれ式(25)(26)のように置き換える。これにより目的関数である社会的総余剰を線形式として表現できる。

$$q_k^{sq} \geq (q_k)^2 \quad \forall k \in N \quad (24)$$

$$CS_k + t_k \\ = C_k \cdot q_k - \frac{1}{2} \cdot A_k \cdot q_k^{sq} - (\text{式(18)右辺}) \quad (25)$$

$$\forall k \in N$$

$$C_k \cdot q_k - A_k \cdot q_k^{sq} = (\text{式(18)右辺}) \quad (26)$$

$$\forall k \in N$$

なお式(3)(25)より、目的関数を最大化するためには $q_k$ を大きく、 $q_k^{sq}$ と一般化費用の総和(=式(18)の右辺)を小さくすることが望ましい。ここで一般化費用の削減には限界があることから、結果的に式(24)の等号が成立し、 $q_k^{sq}$ と $(q_k)^2$ は常に等しくなると考えられる。そして、以上の変形を踏まえると、操作変数の定義域式(20)は以下ようになる。

$$\begin{aligned} z_{m,l}^{pub}, s_{m,l}^{pub} &\in \{0,1\}, \\ Q_k, x_{k,m,l}^{pub}, y_{k,m,m',n}^{pub}, f_{m,l}^{pub}, f_{m,l}^{pub,pass}, u_{k,m,l}^{pub}, \\ p_k^{pub}, x_k^{car}, t_k, q_k^{sq} &\geq 0 \\ \forall k, n \in N, l \in L, m, m' \in M & \end{aligned} \quad (27)$$

#### h) 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)-(16),(18)(19)(23)-(27)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変数を含む二次錐計画問題であり、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 9.1.1を用いて計算を行った。

#### (3) パラメータ設定

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。 $C_k$ は、起点 $k$ 別の利用者の一般化費用に関する最大支払い意思額であり、駅以外の全ノードに一律800円を与えた。 $Q_k$ は起点 $k$ 別の鉄道駅までの最大需要規模であり、駅以外の全ノードに一律の値を与えることとし、400[人/日]から100[人/日]まで50[人/日]刻みで動かしながら繰り返し計算を行った。 $A_k$ は逆需要関数の傾きであり、 $C_k$ を $Q_k$ で除した値を与える。 $F^{pub,max}$ は公共交通サービスの最大運行頻度であり、十分に大きな値として、2880[便/日]を設定した。本研究では交通サービスの営業時間を16[時間/日]と仮定しており、2880[便/日]は20秒に1便出発する状況を表す。なお、実際の計算上、運行頻度が2880[便/日]に達することはなかった。 $F^{pub,min}$ は公共交通サービスの最低運行頻度であり、48[便/日]に設定した。これは20分に1便の間隔で出発する状況を表している。なお、自家用車の運行頻度には上限・下限を設定しない。 $H_{m,l}^{pub}$ は公共交通モード $m$ の車

両容量で、大型交通には 40 [人/便]、小型交通には 5 [人/便] を設定した。定員がそれぞれお 80 [人/便]、10 [人/便] であることを想定しており、50%の乗車率を想定した。なお、自家用車の車両容量はモデル内で明示的には扱っていないが、1 [人/台] を想定している。 $T_{m,l}^{pub}$  は、リンクごとの公共交通サービスの所要時間である。ノード間距離が 1 [km]、表定速度はモードによらず 20 [km/h]、時間価値は 1200 [円/h] と仮定し、60 [円/リンク] に設定した。 $T_k^{car}$  は、自家用車を利用した場合の起点ノードから鉄道駅までの所要時間である。経路・表定速度などは公共交通サービスと同一と仮定し、起点と鉄道駅間の道のりに応じて設定した (60-300 [円])。  $S^{pub}$  は公共交通サービス内の乗継抵抗であり、乗り継ぎに要する待機時間に、乗り継ぎに対する心理的な抵抗を加えたものである。乗継抵抗が大きい場合には 600 [円/回] に、小さい場合には 100 円に設定した。本研究での最低運行頻度における平均待ち時間は 5 [分] であり、時間価値 1200 [円/h] を用いて換算すると、設定した乗継抵抗の値はそれぞれ 30 [分] と 5 [分] に相当する。 $V_{m,l}^{pub}$  は運行頻度に応じてかかるリンク別の公共交通サービス運営費用の単位可変費用である。大型交通は 500 [円/リンク]、小型交通は 300 [円/リンク] と設定した。 $V_k^{car}$  は、起点別に設定した起点から鉄道駅までの自家用車利用費用の単位可変費用である。起点と鉄道駅間の道のりに応じて 50-250 [円/台] に設定した。

### 3. 適切な公共交通 NW 構成

第 2 章で説明したように、本研究では 4 つの観点を総当たりに組み合わせた 9 個条件の下で、最適な公共交通の NW 構成を分析する。それぞれについて、400 [人/日] から 100 [人/日] まで 50 [人/日] 刻みで動かしながら繰り返し計算を行った。

#### (1) 各観点的概要と表現方法

観点(イ)自家用車のみ利用可能な場合・自家用車と公共交通サービス双方を利用可能な場合、は、社会的総余剰の最低値を求める目的で計算する。自家用車のみ利用可能な場合は、式(10)の不等号を等号に、左辺を 0 に置き換えることで表現でき、後述の公共交通に関する観点(ロ)～(二)の違いによる影響は受けない。また、自家用車と公共交通サービス双方を利用可能な場合は、第 2 章で説明した通りの計算で表現できる。

観点(ロ)公共交通 NW において路線の一部縮小を許容しない場合・一部縮小を許容する場合、は地域公共交通計画などを伴った NW 再編を念頭に置いている。路線の一部縮小を許容しない場合とは、地域全体に公共交通サ

ービスを提供するか、もしくは地域内で一切公共交通サービスを提供しないか、という 2 択を迫られる場合を考えている。路線の一部縮小を許容する場合とは、それを改め、社会的総余剰を最大化するためにサービスの空間的提供範囲を変更できるようにした場合である。第 2 章のモデルにおいて、路線の一部縮小を許容しない場合には式(10)を含めて計算すればよく、路線の一部縮小を許容する場合には式(10)を省いて計算すればよい。

観点(ハ)公共交通 NW に大型交通のみ設定可能な場合・大型交通と小型交通の双方を設定可能な場合、は近年普及しつつある小型コミュニティバスを念頭に置いている。交通モード集合  $M$  に含まれるモードを変更して計算を行えばよい。

観点(ニ)公共交通 NW 内の乗継抵抗が大きい場合・小さい場合、は IC カードの普及や近年注目される MaaS の導入など、移動のシームレス化の動きを念頭に置いている。それぞれ乗継抵抗  $S^{pub}$  が大きい場合 (600 [円/回]) と小さい場合 (100 [円/回]) を計算すればよい。

#### (2) 適切な公共交通 NW 構成

4 つの観点を総当たりに組み合わせた 9 つの条件設定は以下のとおりである。

条件 A : 自家用車のみ利用可能

条件 B : 自家用車と公共交通を利用可能  
路線の一部縮小を許容しない  
大型交通のみ設定可能  
乗継抵抗が大きい

条件 C : 自家用車と公共交通を利用可能  
路線の一部縮小を許容しない  
大型交通と小型交通を設定可能  
乗継抵抗が大きい

条件 D : 自家用車と公共交通を利用可能  
路線の一部縮小を許容しない  
大型交通のみ設定可能  
乗継抵抗が小さい

条件 E : 自家用車と公共交通を利用可能  
路線の一部縮小を許容しない  
大型交通と小型交通を設定可能  
乗継抵抗が小さい

条件 F : 自家用車と公共交通を利用可能  
路線の一部縮小を許容する  
大型交通のみ設定可能  
乗継抵抗が大きい

条件 G : 自家用車と公共交通を利用可能  
路線の一部縮小を許容する  
大型交通と小型交通を設定可能  
乗継抵抗が大きい

条件 H：自家用車と公共交通を利用可能  
 路線の一部縮小を許容する  
 大型交通のみ設定可能  
 乗継抵抗が小さい

条件 I：自家用車と公共交通を利用可能  
 路線の一部縮小を許容する  
 大型交通と小型交通を設定可能  
 乗継抵抗が小さい

それらのうち、公共交通が存在しない条件 A を除く、8 条件の下での最適 NW 構成を図-3～図-10 に示した。図の左下に位置する菱形ノードは鉄道駅を表し、その他のノードは居住地を表す。緑色のノードは当該ノードを起点に自家用車を利用して鉄道駅へ向かう交通が存在することを、桃色のノードは当該ノードで乗り継ぎが行われることを表す。また、青線で示されたリンクは大型交通サービスが設定されることを、赤線で示されたリンクは小型交通サービスが設定されることを表す。なお、例えば図-8、図-10 のそれぞれ最上段のように、計算上たまたま異なる形の NW であるが、本質的には同等であることがあり注意する必要がある。また例えば図-3、図-4 のそれぞれ最下段のように、公共交通が設定されながらも、公共交通サービスを利用するために必要な一般化費用が大きすぎるために、自家用車での移動が行われるケースもある。

#### a) 観点(ロ) 路線の一部縮小可否の観点

路線の一部縮小の可否に関する部分を除く全ての条件をそろえ、比較を行う。条件 B と条件 F, 条件 C と条件 G, 条件 D と条件 H, 条件 E と条件 I をそれぞれ比較する。それぞれの組み合わせごとに、最大需要規模に応じた社会的総余剰を図-11～図-14 に示した。なお、参考として、最大需要規模ごとの社会的総余剰の最低値を意味する条件 A 自家用車のみ利用可能な場合の計算結果も併せて載せた。

路線の一部縮小を許容しない場合には、比較的大きな需要があっても公共交通による NW を維持できず、自家用車による移動を強いられる。その結果、特に、小さな需要に不向きな大型交通しか設定できない条件下（条件 B や条件 D）では、需要の減少とともに社会的総余剰が急激に縮小した（図-11、図-13）。

一方で、路線の一部縮小を許容する場合には、需要規模に応じたサービス提供範囲の変更と引き換えに、かなり小さな需要規模でも公共交通サービスが維持されるようになり、その分だけ社会的総余剰が拡大した。そのため特に大型交通しか設定できない条件下で需要が比較的小さな場合に、路線の一部縮小の許容が大きな効果を発揮することがわかった（図-11、図-13）。

一方で、大型交通に加えて小型交通も設定可能な場合

には、需要が小さくても路線の一部縮小を許容せずに NW を維持できる（条件 C や条件 E）。そのため、追加で路線の一部縮小を許容しても追加で得られる効果はあまり大きくないことがわかった（図-12、図-14）。また乗継抵抗が小さい場合も上記に準じた傾向があり、同様の理由から追加で得られる効果はやや小さくなることがわかった（図-13、図-14）。

#### b) 観点(ハ) 小型交通の設定可否の観点

小型交通の設定可否に関する部分を除く全ての条件をそろえ、比較を行う。条件 B と条件 C, 条件 D と条件 E, 条件 F と条件 G, 条件 H と条件 I をそれぞれ比較する。それぞれの組み合わせごとに、最大需要規模に応じた社会的総余剰を図-15～図-18 に示した。なお、参考として、最大需要規模ごとの社会的総余剰の最低値を意味する条件 A 自家用車のみ利用可能な場合の計算結果も併せて載せた。

十分な需要がある場合、大型交通には規模の経済が働き、1人当たりの運営費用が小さくなる。一方で固定費用分が大きいことから（本研究では最低運行頻度制約により表現）、需要が小さな局面ではむしろ1人当たりの運営費用が大きくなってしまう。そのため需要が小さな局面では、より固定費用が小さな小型交通の導入が運営費用を削減し、社会的総余剰を拡大する（図-15～図-18）。一方で、需要が大きな局面では小型交通の併用を許容したとしても大型交通の設定が最適となることが多く、社会的総余剰はあまり拡大しなかった（図-15～図-18）。

また前述のように路線の一部縮小を許容する場合には、小型交通を導入しなくても小さな需要規模で NW を維持できるため、小型交通の設定を可能にしても追加で得られる効果は小さいことがわかった（図-17 と図-18）。また乗継抵抗が小さい場合も、それに準じた傾向があり、同様の理由から追加で得られる効果はやや小さくなることがわかった（図-16 と図-18）。

#### c) 観点(ニ) 乗継抵抗の大小の観点

乗継抵抗の大小に関する部分を除く全ての条件をそろえ、比較を行う。条件 B と条件 D, 条件 C と条件 E, 条件 F と条件 H, 条件 G と条件 I をそれぞれ比較する。そして図-19～図-22 に組み合わせごとの最大需要規模に応じた社会的総余剰を示した。なお、参考として、最大需要規模ごとの社会的総余剰の最低値を意味する条件 A 自家用車のみ利用可能な場合の計算結果も併せて載せた。

乗継抵抗が大きい場合（条件 B, 条件 C, 条件 F, 条件 G）、乗り継ぎはほとんど行われなかった。また小型モードの併用が許容されている場合（条件 C, 条件 G）には、交通量に応じて大型交通と小型交通が棲み分けることがわかった。一方で、乗継抵抗が小さい場合（条件 D, 条件 E, 条件 H, 条件 I）には乗り継ぎが頻繁に行われ、小型交通が併用される場合には、交通量に応じて2つの

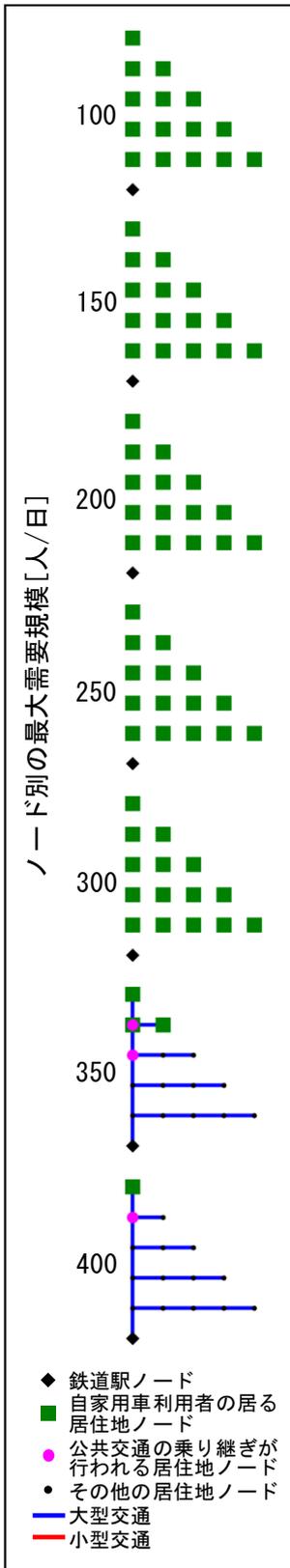


図-3 条件 B

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容しない
- ・大型のみ設定可能
- ・乗継抵抗が大きい

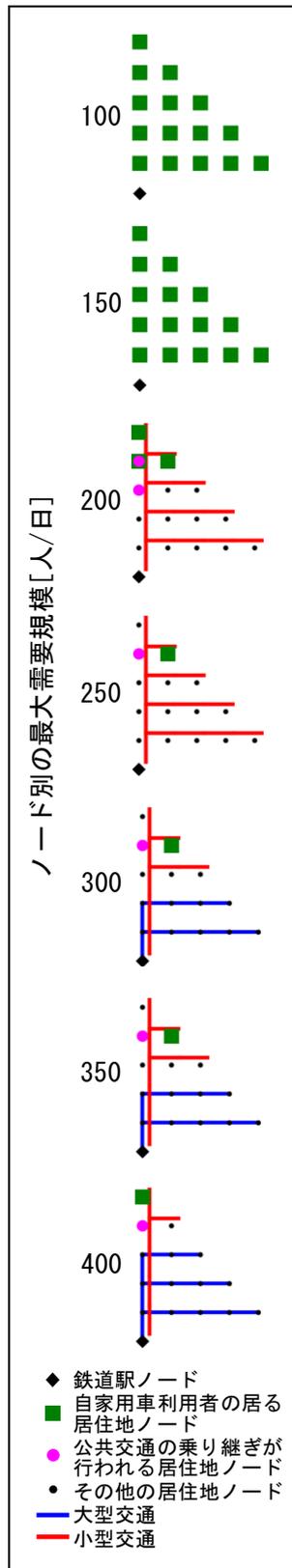


図-4 条件 C

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容しない
- ・大型と小型を設定可能
- ・乗継抵抗が大きい

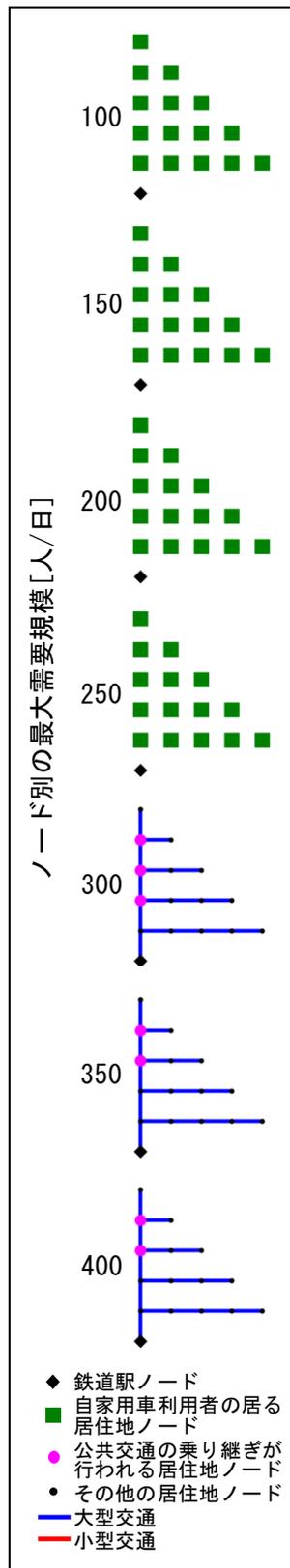


図-5 条件 D

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容しない
- ・大型のみ設定可能
- ・乗継抵抗が小さい

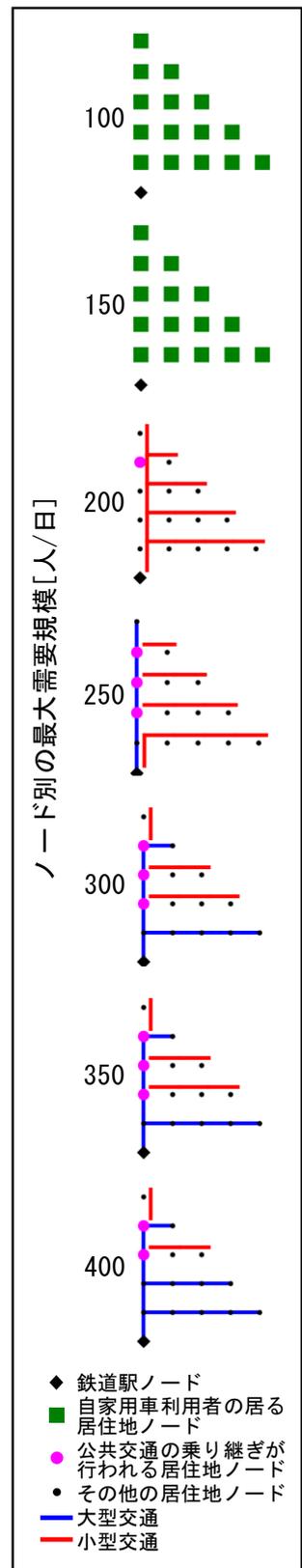


図-6 条件 E

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容しない
- ・大型と小型交設定可能
- ・乗継抵抗が小さい

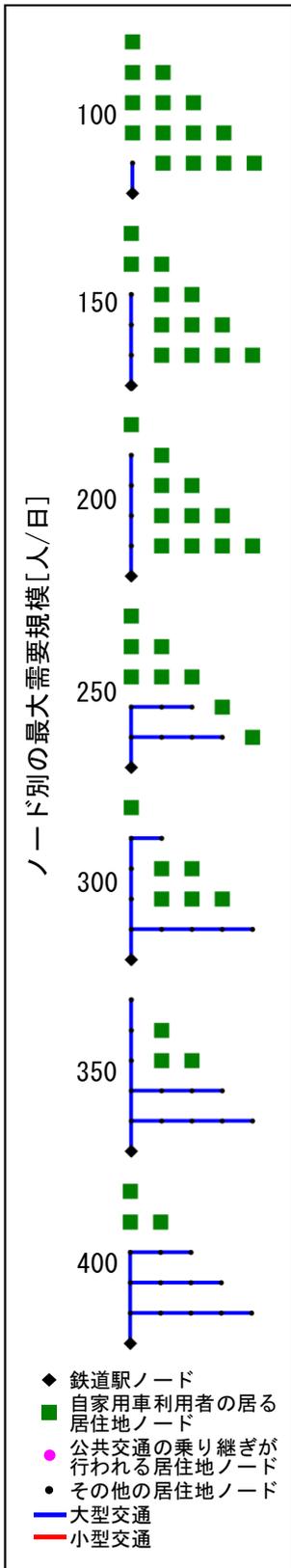


図-7 条件F

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容する
- ・大型のみ設定可能
- ・乗継抵抗が大きい

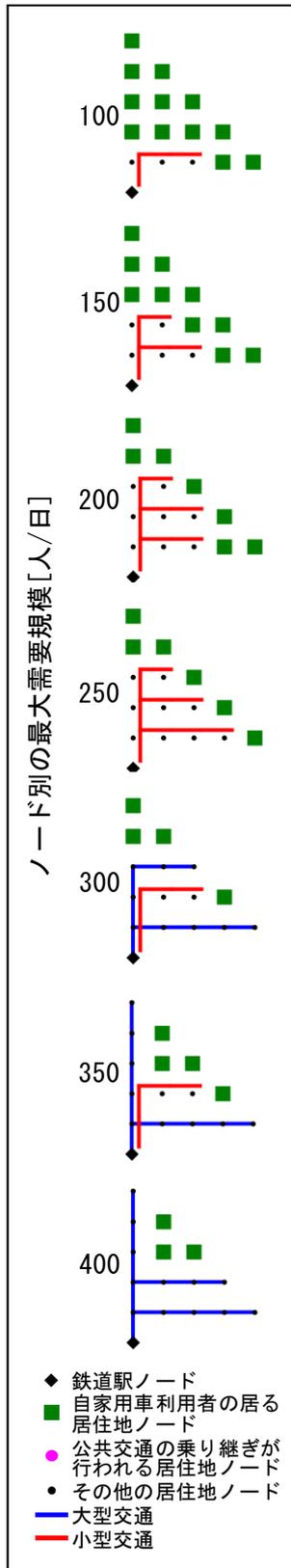


図-8 条件G

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容する
- ・大型と小型を設定可能
- ・乗継抵抗が大きい

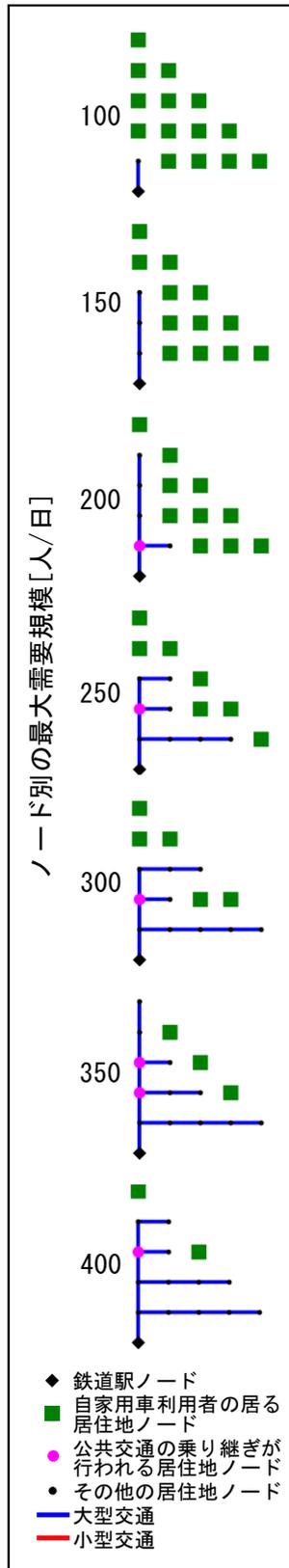


図-9 条件H

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容する
- ・大型のみ設定可能
- ・乗継抵抗が小さい

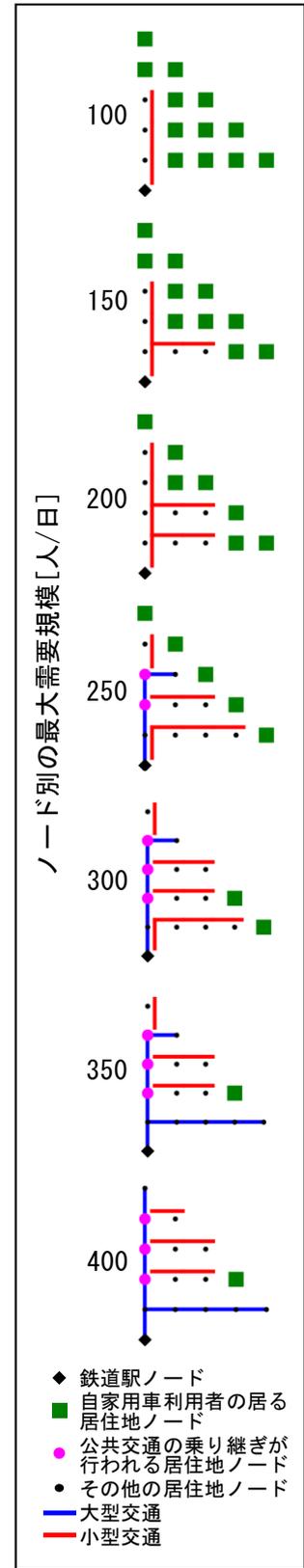


図-10 条件I

- ・自家用車と公共交通を利用可能
- ・路線の一部縮小を許容する
- ・大型と小型を設定可能
- ・乗継抵抗が小さい

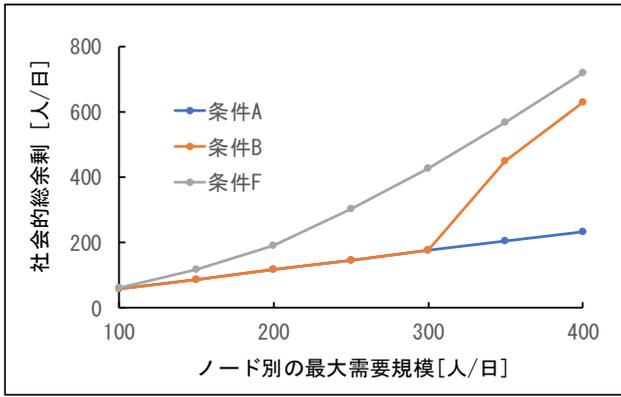


図-11 条件A・条件B・条件Fにおける社会的総余剰

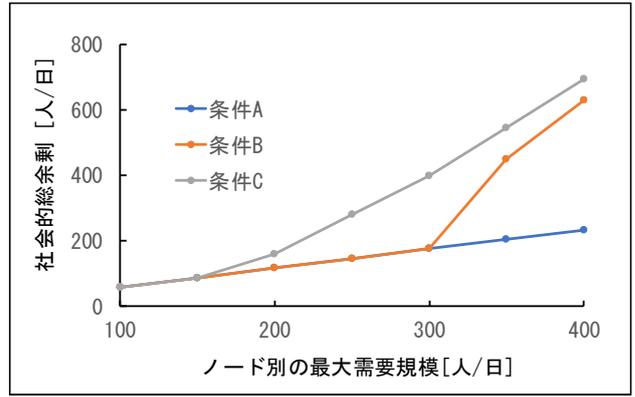


図-15 条件A・条件B・条件Cにおける社会的総余剰

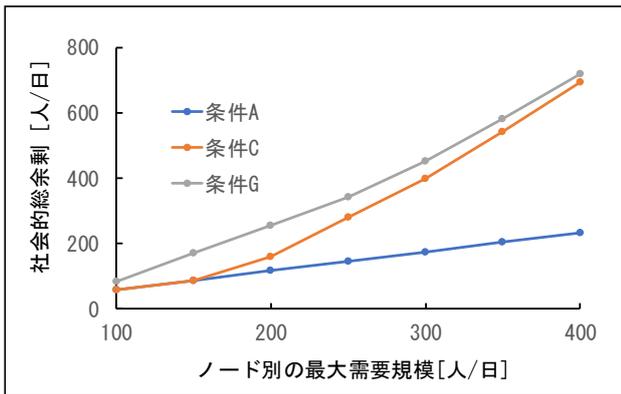


図-12 条件A・条件C・条件Gにおける社会的総余剰

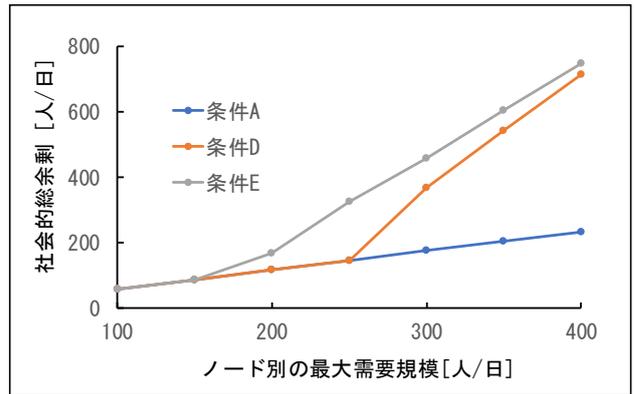


図-16 条件A・条件D・条件Eにおける社会的総余剰

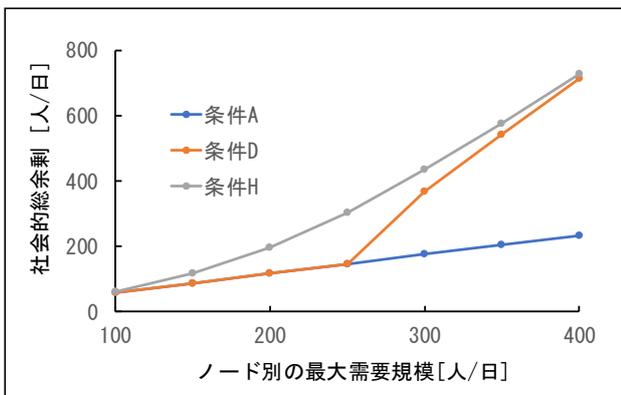


図-13 条件A・条件D・条件Hにおける社会的総余剰

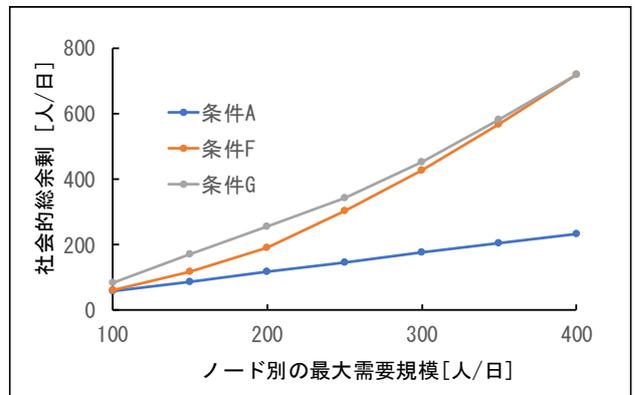


図-17 条件A・条件F・条件Gにおける社会的総余剰

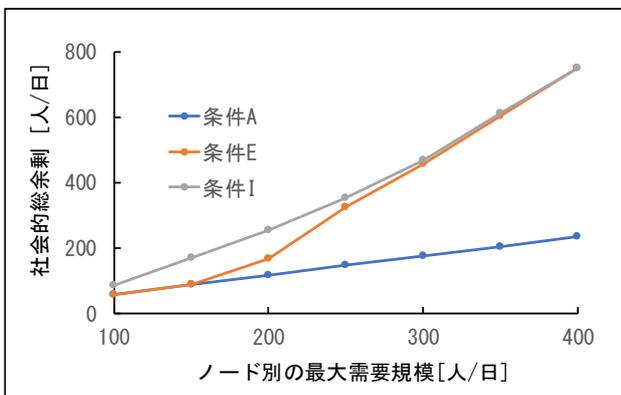


図-14 条件A・条件E・条件Iにおける社会的総余剰

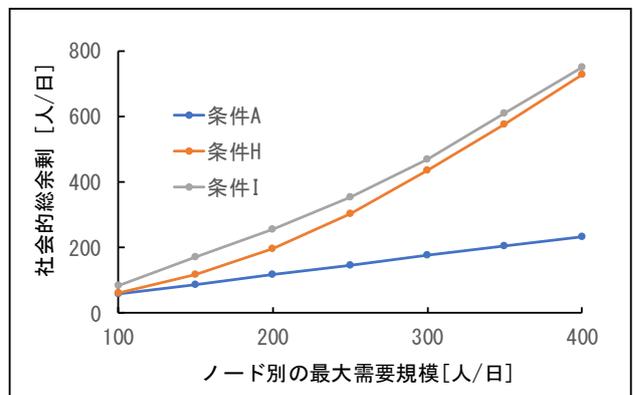


図-18 条件A・条件H・条件Iにおける社会的総余剰

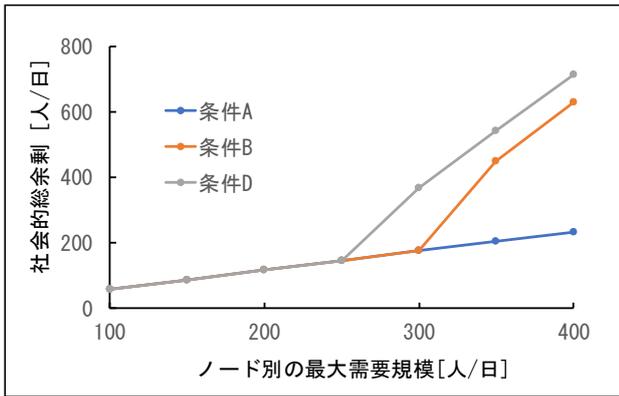


図-19 条件A・条件B・条件Dにおける社会的総余剰

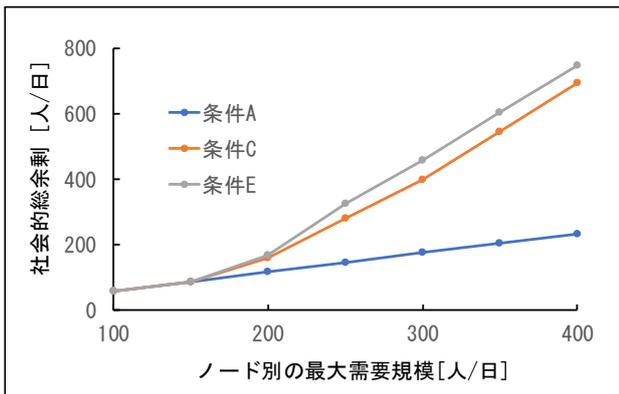


図-20 条件A・条件C・条件Eにおける社会的総余剰

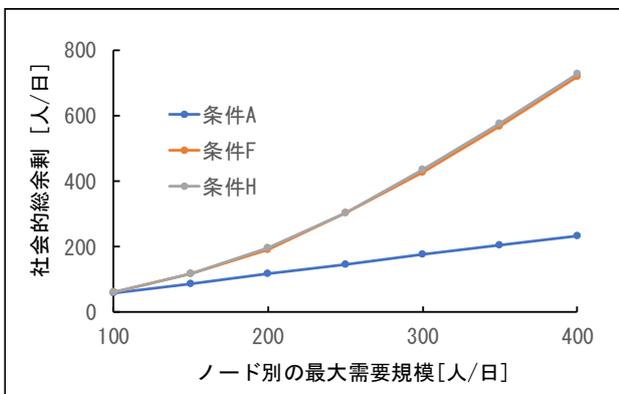


図-21 条件A・条件F・条件Hにおける社会的総余剰

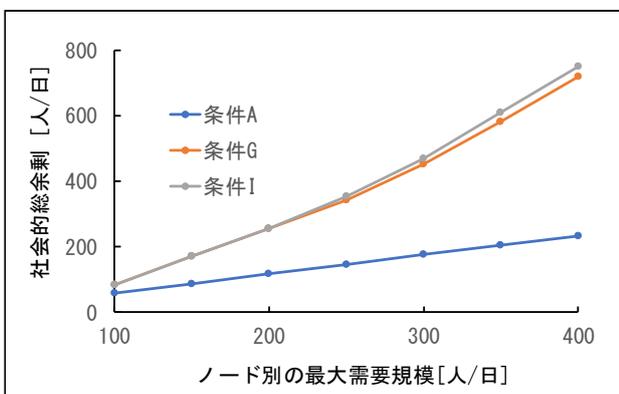


図-22 条件A・条件G・条件Iにおける社会的総余剰

モードが連携して交通サービスを担うことがわかった。このように乗継抵抗の大小に応じてNWの空間的構成が大きく変わるが、しかしながら必ずしも社会的総余剰は大きく変化しない。たしかに路線の一部縮小を許さない場合には、一定程度の社会的総余剰の拡大が認められた(図-19, 図-20)。またその際、他の観点の違いとは異なりNWを維持できる需要規模の範囲がほとんど変わらない一方で、需要が大きな局面でも社会的総余剰の拡大効果が見込めることが分かった(図-19, 図-20)。これは乗り継ぎが需要規模の大小にかかわらず行われるためと考えられる。一方で、路線の一部縮小を許容する場合には、ほとんど全く社会的総余剰が拡大しなかった(図-21, 図-22)。

#### 4. まとめ

本研究では、大都市郊外部の典型的な仮想地域を対象として、公共交通サービスの提供可否、路線の一部縮小可否、小型交通の設定可否、乗継抵抗の大小、の4つの観点から複数の条件を設定し、適切な公共交通NW構成を総当たりに検討して、条件の設定が公共交通NWに与える効果を明らかにした。その結果、以下の特徴が明らかになった。

路線の一部縮小の許容や、小型交通の設定許容は、いずれも需要規模が小さな場合に効果的であり、より小さな需要規模でも公共交通サービスの存続を可能にし、その分だけ社会的総余剰を拡大させることがわかった。ただし、路線の一部縮小の許容と小型交通の設定許容を同時に行っても、社会的総余剰はそれ以上あまり拡大しないこともわかった。

他方、乗継抵抗の削減は、路線の一部縮小を許容しない場合には需要規模の大小によらず社会的総余剰を拡大させる一方で、路線の一部縮小を許容する場合にはほとんど効果を発揮しないことがわかった。なお、大型交通と小型交通の双方が存在する場合には、社会的総余剰の拡大させるか否かにかかわらず、NWの空間的構成を棲み分け的なものから連携的なものへと大きく変化させることもわかった。

それぞれの観点において、公共交通サービスの提供、路線の一部縮小の許容、小型交通の設定の許容、小さい乗継抵抗が、社会的総余剰を拡大することは明らかであり、またそれらを組み合わせても社会的総余剰を縮小させる方向に働くことはない。しかしその一方で、組み合わせや需要規模の大小によってはほとんど効果を発揮しない場合もあり、適切な施策を選択する重要性が示された。

今後は、例えばデマンド型交通の考慮など、本研究で考慮できていない施策についても、検討していく必要が

ある。また自治体等外部からの補助金の考慮も今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局企画部：記者発表資料 総移動回数が調査開始以来、初めて減少、  
<https://www.tokyo-pt.jp/static/hp/file/press/1127press.pdf>, 2019. (2021.2.3 参照)
- 2) 京阪神都市圏交通計画協議会：平成 22 年度の京阪神都市圏における人の動き、  
[https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/pt/research\\_pt/h22/pt\\_h22.pdf](https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/pt/research_pt/h22/pt_h22.pdf), 2012 (2021.2.3 参照) .
- 3) 中京都市圏総合都市交通計画協議会：第 5 回中京都市圏パーソントリップ調査結果の概要、  
[https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/chukyo-pt/persontrip/pdf/gaiyou05\\_02.pdf](https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/chukyo-pt/persontrip/pdf/gaiyou05_02.pdf), 2014 (2021.2.3 参照) .交通権学会：交通権憲章本文,  
<http://www.kotsuken.jp/charter/japanese.html>, 2012, (2021.2.3 参照) .
- 4) 西日本新聞：バス網縮小の一途 18 年間で 55 路線廃止 北九州市議選で論戦求める声,  
<https://www.nishinippon.co.jp/item/n/664908/>, 2020 (2021.3.5 参照) .
- 5) 山形新聞：酒田市内発着の路線バス廃止へ 酒田市と庄内交通が検討, [https://www.yamagata-np.jp/news/202009/05/kj\\_2020090500099.php](https://www.yamagata-np.jp/news/202009/05/kj_2020090500099.php), 2020 (2021.2.3 参照) .
- 6) 安部誠治：交通権の意義とその必要性, *IATSS review*, 37.1, pp.14-22, 2012
- 7) 日下雄介：地域公共交通の活性化及び再生に向けた施策と課題,  
<https://www.tb.mlit.go.jp/tohoku/ks/newpage/ks-sub10-300619kotsu1.pdf>, 2018 (2021.3.6 参照) .
- 8) 石田東生, 谷口守, 鈴木 勉, 古屋秀樹：交通手段の成立可能領域と有利地域に着目した交通政策の有効性の分析, *運輸政策研究* 2 巻 1 号, pp.14-25, 1999.
- 9) 長谷川大輔, 鈴木 勉：需要密度・移動距離に着目した多様な公共交通システムの優位性に関する理論的考察, *都市計画論文集*, 52 巻 3 号 pp.1284-1289, 2017.
- 10) Daganzo, C. F : Structure of competitive transit networks, *Transportation Research Part B Methodological*, 44 (4), pp.434-446, 2010.
- 11) 鈴木 勉：拠点と軸の組合せに着目した都市構造の数理最適化, *都市計画論文集*, 53 巻 3 号, pp.1472-1477, 2018.
- 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.

## MODEL ANALYSIS OF OPTIMAL CONFIGURATION IN SUBURBAN TRANSPORTATION NETWORK

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

Maintaining mobility is an important issue. Although, in many case, discussion goes on whether we continue to serve the present public transportation, or not. However the ultimate goal is to find a way to maintain the present mobility, by mixing various modes including private cars. As transportation demand is going to decline, we have to reorganize public transport networks which is right scale and right configuration, without external financial support. In this research, from the viewpoint of providing appropriate services, we have developed the model which seeks a optimal network configuration that maximizes the total social surplus under the constraint that the operating cost of the transportation service is covered by the fare. Then, in suburbs, various conditions are set from viewpoints, for example, modes to be set and transit resistance, and calculate each optimal social surplus and optimal network configuration. By analyzing the effect, we clarified the optimal configuration of public transportation network in suburbs.