

個別型交通の包含が 地域公共交通システムに与える影響

須ヶ間 淳¹・奥村 誠²

¹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

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

社会情勢の変化により地域の交通需要パターンが変化する一方で、近年、ITの発展に伴って個別型の新モードが登場しつつある。本研究では、大都市圏郊外の駅勢圏においてバス型と個別型の2種類の交通モードを設定できる状況を考える。さらに、個別型モードの運営費用を各利用者が自身の利用量に応じて負担する場合と、公共交通に位置づけて、バス型モードの利用者も含めて負担を最適化する場合を比較し、個別型モードを公共交通に包含することによる社会的総余剰や移動費用の変化を分析した。その結果、個別型モードを公共交通に包含することでバス型モードへの補助がなされ、地域の社会的総余剰を拡大することが分かった。また、駅から遠いノード間の移動費用がより大きく設定される一方、駅に向かう幹線軸上の移動費用は小さくなり需要が喚起されるという点で、コンパクトシティ政策との親和性が高いことが示唆された。

Key Words : *people mover, network design, optimization model, compact city*

1. はじめに

これまでわが国大都市圏では、通勤や購買行動、娯楽を目的に、都心への長距離移動が日常的に行われてきた。そしてそのための巨大な鉄道網、末端交通手段としてのバス網が維持されてきた。しかし、2020年以降、Covid-19感染対策としてテレワークなど移動を伴わない生活が広く普及したため、他市区町村から都心に集まる人口は大きく減少した。一方で、都心部・周縁部を問わず多くの地域で自市区町村内からの滞在人口が増加した¹⁾。Covid-19感染対策は結果的に社会のオンライン化を急速に推し進めたため、流行が緩解したとしても、上記の傾向は継続すると予想される。すなわち、地域の移動需要パターンはCovid-19蔓延を契機に既に変化したものと考えられる。

これまでの地域公共交通は、多くの場合、都心へのMany-to-Oneを想定しており、例えばバス網であれば駅中心の放射状の路線網を形成していた。しかしながら、地域内の需要が増えた場合、必ずしも駅への需要が卓越するとは限らない。すなわちMany-to-Manyの需要パターンを前提としなければ、移動需要を十分にカバーできず

地域の社会的総余剰を縮小させてしまう危険性がある。

地域内の小規模かつ多様なOD需要にきめ細かく対応できる交通モードとして、自家用車に加え、近年、デマンド型交通、シェアリングサービスなど新しい交通モードが登場している。ただし都心方面(すなわち駅方面)への需要もいまだ大きいと、大量輸送機関であるバス網を廃止することは難しい。そのため、地域公共交通計画策定にあたっては「既存の交通手段の活用を基本に、より効率的かつ持続可能な運行形態や交通機関の活用の可能性を幅広く検討・実施すること」²⁾が求められている。またバス型モードと個別型モード(デマンド型交通やシェアリングサービス、自家用車など)の適正な棲み分け・組み合わせに関する研究も近年盛んに行われている。適正な棲み分けに関する研究として、例えば、長谷川・鈴木³⁾は各交通サービスが有利となる都市規模・需要密度を、長谷川・鈴木⁴⁾は各交通サービスが有利となる需要密度・移動距離を明らかにしている。また適正な組み合わせに関する研究として、例えば、富岡ら⁵⁾は路線バスとライドシェアによる交通網の階層化を念頭に適正な交通・土地利用形態を提案している。長谷川・鈴木⁶⁾は経済性・環境性・健康性の観点から路線バスとデマ

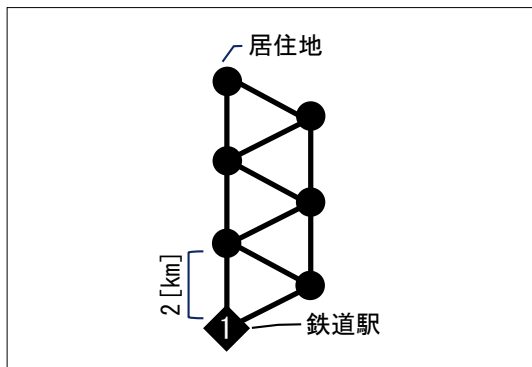


図-1 モデルを適用する仮想地域

ンド型交通の適正な提供バランスを明らかにしている。

上記の研究群では、バス型モードと個別型モードが一体的に、もしくは協力的に運用されるという理想状態を仮定している。しかしその理想状態は必ずしも自明ではない。例えば従来の代表的な個別型モードである自家用車は、個々人の所有物（私的交通）である。そのためパーク&ライドやロードプライシングなど一部の事例を除けば、公共交通網との一体的な運用が難しかった。近年のデマンド型交通やシェアリングサービスの登場は個別型モードが公共交通に包含される期待を高めているが、これらが自家用車の延長として自家用車同様に運用される可能性は排除できない。また、既存交通事業者とは異なる団体が個別型モードの運営を行う場合も、協調した運営が行われるとは限らない。そのため必ずしもバス型モードと個別型モードの一体運用が自明でないことには注意が必要である。

そこで、本研究はバス型交通と個別型モードを一体的運用することによる効果に着目する。公共交通であるバス型モードに対し、個別型モードを私的交通として運営する場合、個別型モードを公共交通に包含させる場合の2通りを考える。そしてそれらと比較し、個別型モードを公共交通に包含させたことによる、モード間の運営資金の補助の有無、地域の社会的総余剰への影響、公共交通ネットワーク（以下、NW）の形状への影響を明らかにする。

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、個別型モードを公共交通に包含することに依る効果の分析を行う。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

本研究では、須ヶ間・奥村⁷⁾のモデルをベースに、個

別型モードが公共交通に包含される場合、されない場合の双方を表現できるモデルを構築した。混合整数二次計画問題（整数は0-1変数）として定式化し、地域の社会的総余剰を最大化する。公共交通に包含される場合・されない場合の最適解を比較することで、包含による効果を明らかにする。

本研究では図-1の仮想地域における1日の交通を考える。この仮想領域は大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模したものである。各リンクの長さは2.0 kmであり、駅から6 kmまでの地域を表している。左下のひし形ノードは都心に至るための駅を、それ以外のノードは居住地を示す。駅・居住地を問わず全てのノード間にOD交通需要を設定するが、その際、駅を発着する需要は居住地間を結ぶOD需要よりも大きく設定する。これは、地域内の移動需要は無視できないが、一方で都心への移動需要もいまだ大きいという状況を再現している。

本研究では、バス型モードと個別型モードの2種類のモードを考える。バス型モードとは固定路線型の大量輸送機関のことであり、いわゆる乗り合いの路線バスを想定している。仮想地域に設定された路線系統を一定の運行頻度で運行する。計算負荷の問題から路線系統は地域内に1つのみ設定できることとした。一方で個別型モードとは、非路線型の個別輸送機関のことであり、自家用車や小型車両によるデマンド型交通を想定している。1人乗車を仮定し、相乗りは考えない。図-1で設定したリンクとは関係なく、出発地と目的地を直接結ぶ。なお、全てのOD交通はどちらかの交通モードを利用して移動することとする。計算負荷の問題から、同モード間・異モード間を問わず乗り継ぎは認めない状況を仮定した。

各ODには予め需要関数を設定する。移動時に支払うOD別一般化支払い額、OD交通量は、需要関数上で内生的に決める。その際、一般化支払い額によって、移動に要する一般化費用（交通モードの運営費用と所要時間の和）を賄うという費用負担制約も考える。費用負担制約は、個別型モードを公共交通に包含するか否かに応じて、2種類を考える。ケース1ではバス型モードを公共交通、個別型モードを私的交通として扱う。すなわちバス型モード利用者の一般化支払い額の地域全体の総和で、バス型モードの利用に必要な一般化費用の地域全体の総和を賄う。一方で、個別型モードの利用者は、各利用者がそれぞれ利用した分だけの一般化費用を支払う。それに対して、ケース2では、個別型モードを公共交通に包含する。すなわちバス型モード・個別型モード双方を公共交通として扱う。その場合、バス型モード・個別型モードを問わず全ての利用者の一般化支払い額の総和によって、地域に必要な一般化費用の全てを賄う。なお、各利用者の移動経路や利用モードは、完全情報を仮定した下で、一般化支払い額が最も小さいものを確定的に選択すると

表-1 集合とその意味

集合	意味
N	居住地(起点ノード)集合
L	有向リンク集合
L_n^{out}	ノード n から発する有向リンク集合
L_n^{in}	ノード n に着する有向リンク集合
L_l^{pair}	リンク l 別の双方向有向リンク集合

表-2 外生パラメータとその意味

パラメータ	意味
$C_{o,d}$	OD別の最大支払い意思額
$Q_{o,d}$	OD別の最大需要量
$A_{o,d}$	OD別の逆需要関数の傾き
M	地域全体のノード数
F^{max}	バス型モードの最大運行頻度
F^{min}	バス型モードの最低運行頻度
G	バス型モードの車両容量
T_l	バス型モードのリンク l 乗車時間の時間価値
$R_{o,d}$	個別型モードのOD間乗車時間の時間価値
V_l	バス型モードの運営に必要な可変費用の車輛走行距離に対する比例係数
$U_{o,d}$	個別型モードの運営に必要な可変費用の車輛走行距離に対する比例係数

表-3 操作変数とその意味

変数	意味 (特段の記載がない変数は非負の連続変数)
$cs_{o,d}$	OD別消費者余剰
$c_{o,d}$	OD別一般化費用
$q_{o,d}$	OD別需要量
$b_{o,d}$	到着時のバス型モードを利用するOD別交通量
$a_{o,d}$	個別型モードを利用するOD別交通量
$s_{o,d}$	出発交通手段の選択を表す0-1変数 (1:バス型モード, 0:個別型モード)
$x_{o,l}$	バス型モードの起点 o 別のリンク l 交通量 リンク l における
z_l	バス型モードのサービス有無を示す0-1変数 (1:有り, 0:無し)
y_n	バス型モードがノード n を経由するか否かを示す0-1変数 (1:経由, 0:不経由)
g	バス型モードの運行頻度
f_l	リンク l におけるバス型モードの運行頻度 (路線系統が経由しない場合はゼロ)
$p_{o,d}$	公共交通利用時のOD別一般化支払い額
h	公共交通事業者の利益
k_n	バス型モードのルート設定に必要な0-1変数 (ダミーリンクの有無 1:有り, 0:無し)
d_n	バス型モードのルート設定に必要な変数 (ダミーリンクを流れるトークンの量を表す)
e_l	バス型モードのルート設定に必要な変数 (リンク l を流れるトークンの量を表す)
$qq_{o,d}$	二次錐計画問題への変換に必要な変数 (OD別の需要量 $q_{o,d}$ の2乗を表す)

仮定する。また、モデル内にて算出されるOD別一般化支払い額は、実際に移動が行われるOD経路に対する支払額であり、選ばれなかった経路の支払額は明示的には示されない。しかし、本研究では、選ばれなかった経路の支払額は、選ばれた経路よりも大きな支払額が設定されていたと考える。

3. モデルの定式化

(1) 集合・パラメータ・変数の定義

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

(2) 目的関数

本研究では、OD別消費者余剰 $cs_{o,d}$ の総和と交通事業者利益 h を足し合わせた社会的総余剰を最大化する。

$$c_{o,d} = C_{o,d} - A_{o,d} \cdot q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (1)$$

(OD別線形逆需要関数)

$$cs_{o,d} = \frac{1}{2}(C_{o,d} - c_{o,d}) \cdot q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (2)$$

(OD別消費者余剰)

$$\max_{cs,c,q,b,a,s,x,w,z,y,g,f,p,h,k,d,e} \sum_{o \in N} \sum_{d \in N} (cs_{o,d}) + h \quad (3)$$

(社会的総余剰の最大化)

(3) 交通量保存則

式(4)-(6)は、起点ノードから終点ノードまでの交通量保存則を表す。起点を個別型モードで出発した交通は起点から終点ノードに直接到着する。起点をバス型モードで出発した交通はバス路線を乗り継いで終点ノードに到着する。式(7),(8)は、バス型モードと個別型モードの間で、二者択一的な交通手段選択がなされることを表す。式(9)は、起点ノードへUターンするという不合理な交通が存在しないことを表している。

$$\sum_{d \in N} q_{o,d} = \sum_{l \in L_n^{out}} x_{o,l} + \sum_{d \in N} a_{o,d} \quad \forall o \in N \quad (4)$$

(起点ノードにおける出発交通の保存則)

$$\sum_{l \in L_n^{in}} x_{o,l} = b_{o,n} + \sum_{l \in L_n^{out}} x_{o,l} \quad \forall o \in N, n \in \{N | n \neq o\} \quad (5)$$

(起点以外のノードにおけるバス型モード利用者の保存則)

$$b_{o,d} + a_{o,d} = q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (6)$$

(終点ノードにおける到着交通の保存則)

$$b_{o,d} \leq s_{o,d} \cdot Q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (7)$$

$$a_{o,d} \leq (1 - s_{o,d}) \cdot Q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (8)$$

(二者択一的な交通手段選択)

$$\sum_{l \in L_o^n} x_{o,l} = 0 \quad \forall o \in N \quad (9)$$

(起点ノードへのUターンの禁止)

(4) バス型モードの路線系統の設定に必要な制約

本研究では、分岐のない路線系統を明示的に表現するため、巡回セールスマン問題の単一品種フロー定式化を応用した。単一品種フロー定式化とは、起点ノードから経由させるノード数より1少ない量のトークンを流し、ノードを通過するごとにトークンを消費させて、ハミルトン路を求める方法である。ただし本研究では通常の巡回セールスマン問題と異なり、一部のノードのみを巡回する経路を許すため、起点・終点ノードと経由数を内生的に求める必要がある。そこでNWに、ダミー起点と、ダミー起点とNW上の他ノードをつなぐダミーリンクを加え、ダミー起点から経由ノード数 (=内生変数) のトークンを流すという定式化に改変した。

式(10), (11)は、トークンが流れるリンクにのみバス型モードサービスが設定されることを表す。式(12)-(14)はダミーリンクに関する制約式である。式(12)はダミーリンクが存在する場合にのみダミーリンクにトークンが流れること、式(13)はダミーリンクがNW内に最大でも1つしか存在しないこと、式(14)はダミー起点から流すトークン量が路線系統の経由ノード数と等しいことを表す。式(15)はトークンのフロー保存則を表す。 y_n はノード n におけるトークンの消費量を表す。リンク l もしくはダミーリンクを経てノード n に到着したトークンは、 y_n だけ消費されて出発する。式(16), (17)は、バス型モードの路線系統がノード n を経由する場合に $y_n = 1$ となることを表す。式(18)は到着リンク数(ダミーリンクを含む)と出発リンク数が等しいか、出発リンク数のほうが少ないことを表す。不等号であるのは終点を表すためである。閉路の場合、起点(ダミー起点ではなくNW上の起点)にはダミーリンクと最終リンクが到着し、出発は1リンクとなるため不等号が現れる。開路ならば、終点では到着リンクのみ存在するため、やはり不等号が現れる。

$$e_l \leq M \cdot z_l \quad \forall l \in L \quad (10)$$

$$z_l \leq e_l \quad \forall l \in L \quad (11)$$

$$d_n \leq M \cdot k_n \quad \forall n \in N \quad (12)$$

$$\sum_{n \in N} k_n \leq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{n \in N} d_n = \sum_{n \in N} y_n \quad (14)$$

$$\sum_{l \in L_n^{in}} e_l + d_n = y_n + \sum_{l \in L_n^{out}} e_l \quad \forall n \in N \quad (15)$$

$$\sum_{l \in L_n^{in}} z_l \leq y_n \quad \forall n \in N \quad (16)$$

$$\sum_{l \in L_n^{out}} z_l \leq y_n \quad \forall n \in N \quad (17)$$

$$\sum_{l \in L_n^{in}} z_l + k_n \geq \sum_{l \in L_n^{out}} z_l \quad \forall n \in N \quad (18)$$

(5) 運行頻度に関する制約

式(19), (20)は、路線系統内の区間運転を許さず、全ての車両が起終点間を往復することを表す。路線系統 r が設定される場合、経路上のリンクの運行頻度は $f_l = g$ 、経路外のリンクの運行頻度はゼロとなる。式(21), (22)は、リンクにサービスが設定される場合にのみ運行頻度が0ゼロより大きくなり、利用客を輸送できることを表す。なお最大運行頻度 F^{max} は需要に対して十分に大きいと仮定し、リンクにサービスが設定される限りは経路選択に影響を与えない。また本モデルでは車両容量 G を超えて乗車することはできないこととした。式(23)は最低運行頻度 F^{min} を表す。なお、仮に必要なない路線系統が現れる場合にはその運行頻度をゼロと置くのではなく、経由するリンクが存在しないものとして表現する。式(24)は運行頻度がリンクの双方向で等しいことを示す。

$$g - F^{max} \left(1 - \sum_{l' \in L_l^{pair}} z_{l'}\right) \leq f_l \quad \forall l \in L \quad (19)$$

$$f_l \leq g \quad \forall l \in L \quad (20)$$

(路線系統上の運行頻度の同一性)

$$f_l \leq F^{max} \cdot \sum_{l' \in L_l^{pair}} z_{l'} \quad \forall l \in L \quad (21)$$

$$\sum_{o \in O} x_{o,l} \leq G \cdot f_l \quad \forall l \in L \quad (22)$$

(利用者数の容量制約)

$$F^{min} \leq g \quad \forall l \in L \quad (23)$$

(最低運行頻度の制約)

$$f_l = f_{l'} \quad \forall l \in L, l' \in L_l^{pair} \quad (24)$$

(運行頻度の双方向の同一性)

(6) 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も発生する。本モデルでは、運営費用と所要時間の和を移動に必要な一般化費用と捉え、すべて利用者が負担すると考える。そしてその際、負担のさせ方が異なる2種類の運用方法を考える。1つは私的交通としての運用であり、各

利用者がそれぞれの移動にかかった分だけ負担する。もう一方は公共交通としての運用であり、OD 別に移動に要する一般化費用を設定し、その総和で地域全体の運営費用、所要時間を賄う。本研究では2種類の交通モードを扱うが、バス型モードは常に公共交通として運用することとし、個別型モードを私的交通として運用するケース（ケース 1）と、両者を合わせて公共交通として運用するケース（ケース 2）の 2 通りを考える。それぞれに対応する定式化を行う。

式 (25) - (27) はバス型モードのみが公共交通のケース（ケース 1）の費用負担配分に関する制約、式 (28), (29) は個別型モードも公共交通として運用するケース（ケース 2）の費用負担配分に関する制約である。

式(25)は利用者の一般化支払い額の地域全体の総和から公共交通事業者の利益 h を差し引いた額によって、バス型モードの運営に必要な費用、所要時間の時間価値の地域全体の総和を賄うという条件を示している。ただし集めた収入を交通事業者の利益に充てるより、交通サービスの運営に充てたほうが、社会的総余剰が大きくなる。そのため、交通事業者利益 h は原則としてゼロになる。式(26)は、バス型と個別型モードの二者択一を表す式(7),(8)と併せることで、ODペアごとの一般化支払い額の総額が、選択されたモードの一般化費用にそれぞれ充てられることを表している。式(27)は、バス型モードを選択した時に実現する一般化支払い額が、私的交通である個別型モードの一般化支払い額より小さい場合のみ、バス型モードが利用されることを表している。

一方で、式(28) (29)は、バス型モードと個別型モードを区別せず、収受された一般化費用が全体として両者の運営に用いられることを表している。一般化支払い額の具体的な額は、目的関数（式(3)）である社会的総余剰を最大化するように内生的に設定される。なおケース 2 では、バス型モードと個別型モードの二者択一を表す式 (7), (8)より、選択されないモードは選択されるモードより一般化支払い額が大きいために選ばれないと考える。

$$\sum_{o \in N} \sum_{d \in N} p_{o,d} - h = \sum_{l \in L} V_l \cdot f_l + \sum_{o \in N} \sum_{l \in L} T_l \cdot x_{o,l} \quad (25)$$

(バス型モードの経済的収支)

$$c_{o,d} \cdot q_{o,d} = p_{o,d} + U_{o,d} \cdot a_{o,d} + R_{o,d} \cdot a_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (26)$$

(ODごとの一般化費用)

$$c_{o,d} \cdot q_{o,d} \leq U_{o,d} \cdot q_{o,d} + R_{o,d} \cdot q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (27)$$

(バス型モード使用時一般化費用の合理性)

$$\sum_{o \in N} \sum_{d \in N} p_{o,d} - h = \sum_{l \in L} V_l \cdot f_l + \sum_{o \in N} \sum_{l \in L} T_l \cdot x_{o,l} + \sum_{o \in N} \sum_{d \in N} U_{o,d} \cdot a_{o,d} + \sum_{o \in N} \sum_{d \in N} R_{o,d} \cdot a_{o,d} \quad (28)$$

(両モードを含む公共交通全体の経済的収支)

$$c_{o,d} \cdot q_{o,d} = p_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (29)$$

(ODごとの一般化費用)

(7) 各操作変数の定義域

$$s_{o,d}, z_l, y_n, k_n \in \{0,1\},$$

$$cs_{o,d}, c_{o,d}, q_{o,d}, b_{o,d}, a_{o,d}, x_{o,l},$$

$$g, f_l, p_{o,d}, h, d_n, e_l \geq 0 \quad (30)$$

$\forall o, d, n \in N, l \in L$

(8) 二次錐計画問題への変形

定式化に含まれる非線形制約（式(2), (26), (27), (29)）を、線形制約または凸二次錐制約に変形し、二次錐計画問題に帰着させる。まず、式 (2), (26), (27), (29)に式 (1) を代入し、変数 c_k と式(1) を消去する。その際、 $A_{o,d}$ の定義より $C_{o,d}/Q_{o,d} = A_{o,d}$ であることに注意する。そして、新たな変数 $qq_{o,d}$ を定義し（式(31)）、 $(q_{o,d})^2$ を $qq_{o,d}$ に置き換える。その結果、式 (2), (26), (27), (29)はそれぞれ線形式 (32)-(35)に置き換えられる。

なお、式 (3), (32)より目的関数を最大化するためには $qq_{o,d}$ を大きくする必要があり、そのためには式(33) - (34)または式(35)より $q_{o,d}$ を大きくする必要がある。しかし、 $q_{o,d}$ を大きくしようとする一般化費用が大きくなってしまったため、 $qq_{o,d}$ の最大化には限界がある。結果として式(33)は等式が成立する。

$$qq_{o,d} \geq (q_{o,d})^2 \quad \forall o, d \in N \quad (31)$$

$$cs_{o,d} = \frac{1}{2} A_{o,d} \cdot qq_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (32)$$

$$C_{o,d} \cdot q_{o,d} - A_{o,d} \cdot qq_{o,d} = p_{o,d} + U_{o,d} \cdot a_{o,d} + R_{o,d} \cdot a_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (33)$$

$$C_{o,d} \cdot q_{o,d} - A_{o,d} \cdot qq_{o,d} \leq U_{o,d} \cdot q_{o,d} + R_{o,d} \cdot q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (34)$$

$$C_{o,d} \cdot q_{o,d} - A_{o,d} \cdot qq_{o,d} = p_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (35)$$

$$q_{o,d} \leq Q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (36)$$

$$s_{o,d}, z_l, y_n, k_n \in \{0,1\},$$

$$cs_{o,d}, q_{o,d}, qq_{o,d}, b_{o,d}, a_{o,d}, x_{o,l},$$

$$g, f_l, p_{o,d}, h, d_n, e_l \geq 0 \quad (37)$$

$\forall o, d, n \in N, l \in L$

(9) 定式化のまとめ

個別型モードを私的交通として扱うケース 1 では、本モデルは式(3)を目的関数、式(4)-(25), (31)-(34), (36),

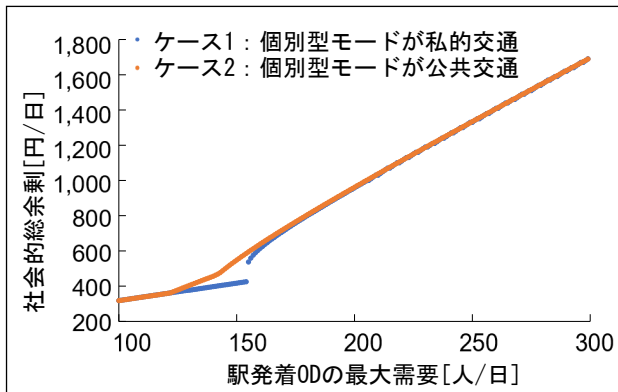


図-2 公共交通への包含による社会的総余剰の差異

(37)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。一方で個別型モードを公共交通に含めるケース2では、式(3)を目的関数、式(4)-(24),(28),(31),(32),(35)-(37)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。

本モデルはいずれの場合も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。Gurobi Optimizer 9.1.1を用いて計算を行った。

(10) 外生パラメータの設定

適用地域は、第2章で述べた通り、大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模した図-1の仮想地域である。駅(左下のひし形のノード)から6km圏までの地域を表しており、ノード数 M は7つ、ノード間距離は2kmである。

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。 $C_{o,d}$ は、OD別利用者の一般化費用に関する最大支払い意思額であり、全ODに一律1600円を与えた。 $Q_{o,d}$ はOD別の最大需要規模である。駅を発着するOD、駅以外のノード同士を発着するODにそれぞれ一律の値を与えた。駅を発着するODの最大需要規模は100[トリップ/ノード/日]から300[トリップ/ノード/日]まで1[トリップ/ノード/日]刻みの値を与えて繰り返し計算を行った。駅以外のノード同士を発着するODには15[トリップ/ノード/日]を与えた。 $A_{o,d}$ は逆需要関数の傾きであり、 $C_{o,d}$ を $Q_{o,d}$ で除した値を与えた。 F^{max} はバス型モードの最大運行頻度であり、960[便/日]を与えた。本研究では交通サービスの営業時間を16[時間/日]と想定しており、1分に1便出発するという十分に大きな値である。実際の計算において運行頻度がこの値に達することはなかった。 F^{min} はバス型モードの最低運行頻度であり、20分に1便の間隔で出発する状況として48[便/日]を与えた。なお、個別型モードには最低運行頻度、最大運行頻度を設定しない。

G はバス型モードの車両容量であり、定員80[人/便]の車両に乗車率50%で乗車すること考えて、40[人/便]を与えた。なお、個別型モードの車両容量は定員1[人/便]で

ある。バス型モードのリンク別所要時間価値を表す T_l は、リンク距離を2[km]、表定速度を20[km/h]、時間価値を1200[円/h]と仮定し、120[円/リンク]を与えた。個別型モードのOD別所要時間価値を表す $R_{o,d}$ は、リンク距離の代わりにOD距離を用いて同様に計算し、120-360[円/リンク]を与えた。

V_l はバス型モードの車両走行距離に応じてかかるサービス運営費用の原単位であり、500[円/km/便]を与えた。同様に $U_{o,d}$ は個別型モードの車両走行距離に応じてかかるサービス運営費用の原単位であり、200[円/km/便]を与えた。

4. 結果と考察

図-2は、個別型モードを私的交通として扱った場合、公共交通として扱った場合それぞれについて、駅への最大需要に応じた地域全体の社会的総余剰を表している。曲線中の傾きが変わる点では、その前後でバス型モードの路線系統の形状が変化している。代表的なNWを図-3に示す。図-3上段は個別型モードが私的交通の場合の代表的NWを、下段は個別型モードが公共交通の場合の代表的NWを示している。駅への需要が小さい場合には全ODが個別型モードで担われる一方、駅への需要が十分に大きい場合にはバス型モードが設定される。図-3の上段と下段を比較すると、個別型モードを公共交通として扱った場合(下段)のほうが、より小さな交通需要でもバス型モードを設定できることが分かる。これは、個別型モードが公共交通に含まれる場合には、個別型モードがバス型モードを補助しているためと考えられる。

図-4は、個別型モードを公共交通に含めた場合の、リンク別の交通量の増減と、ノード別の消費者余剰の増減を表している。水色のリンク・ノードは増加を、赤いリンク・ノードは減少を表している。また、太さや大きさは増減の絶対値を表している。図-4より、公共交通への包含によって、個別型モード利用者が減少し、バス型モード利用者が増加している。このことは、個別型モード利用時の一般化支払い額の増加、及びバス型モード利用時の一般化支払い額の減少を意味しており、やはり個別型モード利用者がバス型モード利用者を補助していることが読み取れる。

個別型モードは主に駅から遠方の域内OD需要を、バス型モードは駅への需要を担っている傾向にある(図-3)。個別型モードからバス型モードの補助は、一見すると、移動が便利地域はますます便利に、移動が不便な地域はより不便になるように感じる。補助が行われることで、地域全体の社会的総余剰が拡大しても、地域内の格差は広がるのではないかと考えるだろう。確かに個別

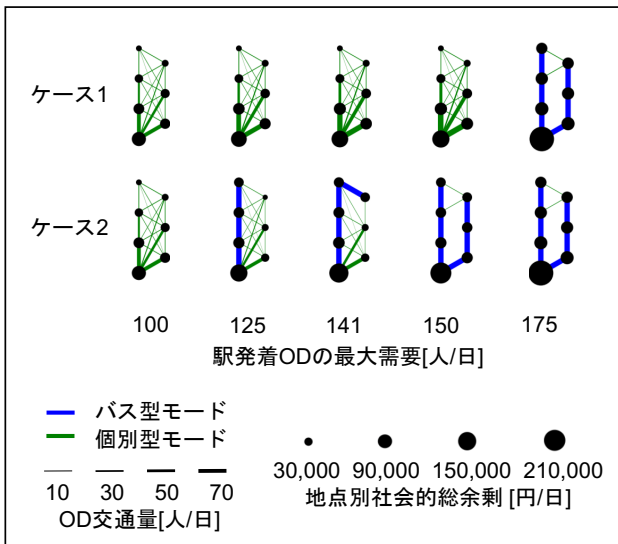


図-3 公共交通への包含によるNWと社会的余剰の変化

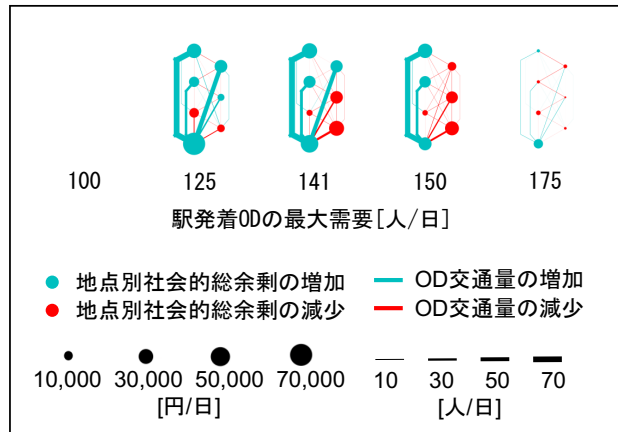


図-4 公共交通への包含によるOD交通量と社会的余剰の変化

型モードのみが経由するノードのノード別社会的余剰は、公共交通への包含によって減少している(図-4)。しかし、各ODの需要関数の傾きに大きな差がない場合、かつバス型モードが地域全域をカバーする場合には、むしろ格差を縮小させる傾向にあることが明らかになった(図-4)。

図-3のノードの大きさはノード別社会的総余剰を表している。もともと社会的総余剰が小さい、駅から遠いノードでは、個別型モードの公共交通への包含により近隣のノードへの交通量が減少しても、駅への交通量が大きく増加すればノード別社会的余剰はむしろ拡大するのである。一方で、比較的社会的総余剰の大きい、駅に近いノードでは、ノード別社会的総余剰が小さくなる傾向が見られた。格差助長の印象とは裏腹に、公共交通化への包含はむしろ地域内の地点別社会的余剰を平準化することが示唆された。

5. まとめ

今後、技術革新や社会情勢の変化により個別型モードはますます普及していくだろう。本研究では、個別型モードの公共交通への包含が地域の社会的総余剰や公共交通NWの形状に与える効果を、数理モデルを用いて明らかにした。

個別型モードを公共交通に包含すると、個別型モードはバス型モードに運賃収入の一部を移転(運営資金の補助)するようになる。その結果、より多くの区間にバス型モードを提供できるようになり、地域全体の社会的総余剰を拡大できることが明らかになった。また個別型モードの公共交通への包含は、地域全体の社会的余剰を増大させるだけでなく、地点ごとの社会的余剰を平準化する効果も持つことも示した(ただし、OD別の需要関数に大きな違いが無く、またバス型モードが地域内の全ノードを経由する場合)。バス型モードと個別型モードは対立するものではなく、協力し合うべきものであることが示唆された。

一方で、バスが経由しないノードの地点別社会的余剰は縮小することも明らかになった。すなわち、現在の仮定下では、地域全体にくまなくバスを走らせられなければ、社会的余剰の格差が広がってしまう。これを防ぐためには、モード間の乗り継ぎを許容するなど、モード間のより一層の連携を検討する必要があるだろう。

また、本研究の結果は、駅と周辺部を結ぶ大量輸送機関に資金を注入し、駅前に目的地を集中させることが望ましいというものであり、コンパクトシティ・プラス・ネットワークと親和性が高い。コンパクトシティ・プラス・ネットワークの考えに則れば、一部地域のモビリティが悪化することはやむをえないと考えることもできるが、その場合、どの地域にバス型モードを維持すべきかが大きな問題となる。適切な選択基準を明らかにする必要がある。これらについては、今後の研究課題とした。

参考文献

- 1) 内閣府 地方創生推進室 ビッグデータチーム：V-RESAS, <https://v-resas.go.jp/prefectures/11>, (2021.9.30 参照).
- 2) 国土交通省：地域公共交通計画等の作成と運用の手引き 第2版, 2021, <https://www.mlit.go.jp/common/001393083.pdf>, (2021.9.30 参照).
- 3) 長谷川大輔, 鈴木 勉：都市規模・密度に着目したデマンド型交通成立条件に関する理論的考察, 都市計画論文集, 46巻3号, pp.817-822, 2011.
- 4) 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.

- 5) 富岡 秀虎, 村上 僚祐, 高山 宇宙, 森本 章倫: MaaS の普及を想定した公共交通と人口分布に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5, pp.I_793-I_801, 2021.
- 6) 長谷川 大輔, 鈴木 勉: 路線網形状を考慮したバス・デマンド型交通併用効果の分析, GIS-理論と応用, 27 巻 1 号 pp.1-11, 2019.
- 7) 須ヶ間 淳, 奥村 誠: 郊外部交通システムにおける乗り換え抵抗削減のモデル分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5, pp.I_967-I_776, 2021.

(Received October 1 2021)

THE IMPACT OF THE INCLUSION OF PERSONAL MOVERS ON PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS IN A SUBURBAN STATION AREA

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

While regional transportation demand patterns are changing due to changes in social conditions, new individualized modes are emerging with the development of IT in recent years. In this study, we consider that two types of transportation modes, the traditional bus and individual personal movers (PM) can be set in a suburban station area of a metropolitan area. Further we compared two cases with different positioning of PM, in terms of inclusion into regional public transportation system. When the PM is treated privately, the operating cost is borne by each user according to the number of times he or she uses the mode. On the other hand, when the mode is positioned as public transportation, the burden is optimized by including the users of bus transportation, also. As a result of analyzing the changes in the total social surplus and the cost of travel between ODs, the public inclusion of PM subsidizes bus transportation and increases the total social surplus. In addition, the cost of traveling between nodes far from the station is set higher, while the cost of traveling toward the station is lower, stimulating demand on the trunk axis. This indicates that the inclusion of PM in public transportation has a high affinity with compact city policies.