

需要の空間分布が 郊外部交通システムの最適形状に及ぼす影響

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)

人口減少の進む我が国では、地域の暮らしを維持できるような地域の形を実現することが重要であり、その方向性としてコンパクトシティ・プラス・ネットワークという考え方が提案されている。この時、既存の交通ネットワークを所与として近隣に土地利用を集約するだけでなく、公共交通ネットワークを持続可能な形状に改変しておくことも重要である。本研究では、大都市圏郊外部を対象に、空間の需要分布が公共交通ネットワークの最適形状に与える影響を分析した。既存の都市間マルチモードネットワーク最適化モデルを鉄道駅周辺のバスネットワークに適用し、外生的に与える需要の空間分布を変えながら計算を行った。そして得られた最適ネットワークの形状や消費者余剰の変化を分析し、その特徴を明らかにした。

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

1. はじめに

人口減少の進む我が国では、地域での暮らしを維持できるような地域構造の実現が重要である。その方向性としてコンパクトシティ・プラス・ネットワークという考え方が既に提案されており、多くの市町村がそれに基づいて立地適正化計画や地域公共交通網形成計画の策定を行っている。この時、土地利用と公共交通システムは相互に影響を与え合うことから、既存の交通ネットワークを所与として近隣に土地利用を集約するだけでなく、交通ネットワークを持続可能な形状に再編することが重要である。しかしながら、土地利用については交通ネットワークに隣接させるという空間的指針が存在するのに対し、交通ネットワークにはどのような形状に再編すべきかという指針は見当たらず、その解明が急務である。見込まれる将来の需要分布に対して、どのようなネットワークに再編すべきなのかを数理的に解明する必要がある。

しかしながら既存の関連研究には、最適なネットワーク形状を数理的に検討したものがほとんど見当たらない。例えば菊池・室町¹⁾はコンパクトシティと公共交通ネットワークの関係に着目しているが、既存の公共交通網の維持を念頭に置いている。新しい交通モードや MaaS の

普及に着目した公共交通網の再編に関する研究²⁾は存在するが、具体的なネットワーク形状については扱っていない。小方³⁾は、実在都市の路線バスネットワークについてグラフ理論の観点から分析を行っており興味深い。再編方針を議論したものではない。その中で鈴木⁴⁾は、拠点と交通軸からなる都市構造を数理的に最適化する研究を行っている稀有な例である。ただし設定できる交通ネットワークを事前に外生的に与えていることから最適なネットワークを見逃す可能性を否定できない⁵⁾。また、交通量を外生的なパラメータで与えていることも特徴である。

我が国では、公共交通システムの運営に必要な費用は利用者の支払額によって賄うという、受益者負担が原則となっている。そのため、利用者が増えれば1人当たりの負担額が小さくなって利便性が大きくなるという規模の経済が働き、さらに利便性の増加が利用者の増加につながるという正のフィードバックが働く。しかし、人口減少などにより一旦利用者が減少に転じると、この正のフィードバックが交通システムの運営を困難にすることになる。この時、適切な形状に変更することにより、サービスの破綻を防ぎ、土地利用と人口のさらなる減少をとどめる方法が見つかる可能性がある。そこで、本研究

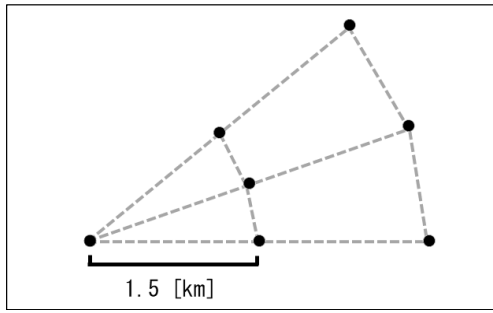


図-1 扇形の仮想領域

表-1 集合とその意味

変数	意味
N	地点(ノード)集合
N^{ctr}	扇頂を表すノード集合
L	有向リンク集合
L_n^{dep}	ノード n から発する有向リンク集合
L_n^{arv}	ノード n に着する有向リンク集合
A	無向リンク集合
A_l^{line}	有向リンク l に対応する無向リンク集合
A_n^{node}	ノード n に接続する無向リンク集合
R	路線システムの集合

表-2 操作変数とその意味

変数	意味
$cS_{o,d}$	OD別の消費者余剰の総額
$c_{o,d}$	OD別の1人当たりの一般化された支払額
$q_{o,d}$	OD交通量
$g_{o,d,r}$	起点 o ・到着時の路線系統 r 別の目的地 d への到着交通量
$x_{o,r,l}$	起点 o ・系統 r ・有向リンク l 別の交通量
$y_{o,r,r',n}$	起点 o 別の、ノード n における系統 r から系統 r' への乗り換え交通量
$z_{r,a}$	系統 r 、無向リンク a 別に交通サービス有無を示す0-1変数
$t_{o,n,n'}$	起点 o 別の、扇頂部分におけるノード n からノード n' への乗り換え交通量
$q_{o,d}^{sq}$	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
$C_{o,d}$	OD別の最大支払意思額
$Q_{o,d}$	OD需要
$\beta_{o,d}$	OD別の逆需要関数の傾き
H	無向リンク a の最大輸送容量(十分に大きな数)
θ	時間価値
U	ネットワークを維持するための固定費用
V_l	リンク l の交通サービスを維持するための可変費用
T_l^{rid}	リンク l の所要時間
T^{trs}	乗り換え抵抗

ではこの利便性と交通量の相互関係を考慮しながら、空間的な需要分布が郊外部交通システムの最適形状に及ぼす影響を分析し、需要分布に応じた最適形状の特徴を明らかにして、人口減少期の公共交通システムの再編方策に対して有用な知見をうることを目指す。

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、需要分布に応じた最適ネットワークの特徴について分析する。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

(1) 本研究で扱う問題

本研究では、郊外部交通システムとして、図-1に示すような扇形の仮想領域におけるバスネットワークのある1日の交通を扱う。この仮想領域は、大都市圏郊外部の鉄道駅周辺における路線バスネットワークを模したものである。各リンクの長さは0.5~1.5kmであり、放射状リンクの仰角はそれぞれ20度と40度である。この仮想領域において、需要の空間分布(鉄道駅(=中心街)から地域内各地点までのOD需要の大小)を変化させ、それに適した最適ネットワーク形状の変化について分析を行う。なお本研究では、地域の移動利便性は総消費者余剰によって評価することとし、最適ネットワーク形状とは、総消費者余剰を最大化するネットワーク形状と定義する。また、利用者は完全情報下で、乗り換え抵抗を含む経路の一般化費用に基づいて最短経路を選択すると仮定する。

(2) 最適ネットワークの計算方法

本研究では、細・奥村⁹⁾のMNPモデルを基にしたモデルを用いて最適ネットワークの計算を行う。MNPモデルは、多モードの都市間公共交通を念頭に開発したネットワーク最適化モデルであり、以下の特徴を持つ。

- ・OD需要(=最大OD交通量)を所与、OD交通量・経路、ネットワーク形状を操作変数として総消費者余剰を最大化する。
- ・OD交通量は、予め設定したOD別の需要関数に基づき、地域全体の支払い額の総和が、地域全体の一般化費用の総和を上回るように内生的に決定される。
- ・混合整数二次錐計画問題(ただし整数は0-1変数のみ)として定式化しており、商用最適化ソルバーによる求解が可能である。

すなわちMNPモデルを用いればOD需要分布と最適ネットワーク形状の関係について、OD交通量・経路を媒体に比較的簡便に計算・分析することができる。本研究は、都市内公共交通である単一のモードであるバスネッ

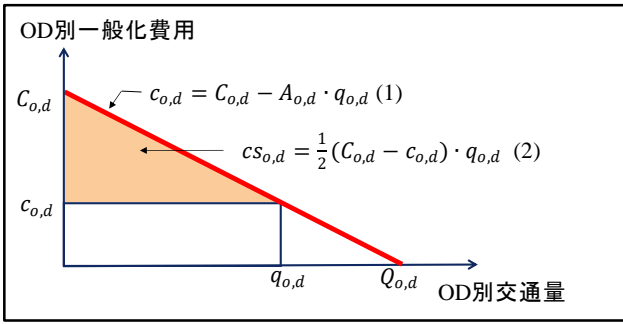


図-2 OD別の逆需要関数と消費者余剰

トワークを扱うが、このネットワークを構成するバスの複数の運行システムを乗り継ぎながら利用できることに着目して、MNPモデルの複数のモードと対応させることで、多モード都市間交通を対象とするMNPモデルの基本構造を利用してモデルを構築することとする。すなわち、MNPモデルに以下のような修正を加える。

- ・都市内交通に即したパラメータの設定
- ・バス路線の系統と乗り換えの表現

3. 郊外部交通システムの形状最適化モデル

(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。

(2) 定式化

a) 目的関数

OD別の逆需要関数を式(1)の線形式で表す、OD別の消費者余剰 $cs_{o,d}$ は、図-2を参考に式(2)のように表せる。本モデルでは総消費者余剰を目的関数とし、最大化する(式(3))。

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

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

$$\max_{cs, c, x, y, z, t, q, g} \sum_{o \in N} \sum_{d \in N} cs_{o,d} \quad (3)$$

b) 交通量保存則

表-2に示すように、本モデルでは通過リンクごとの系統別交通量を、ODの起点ごとに区別して扱う。式(4)は扇頂以外の各ノードにおける交通量保存則を表す。各系統のノード n において“同一系統他ノードから到着した交通”もしくは“他系統同一ノードから乗り換えてきた交通”が、そのノードを目的地としているか、“同一系統他ノードに出発する交通”もしくは“他系統同一ノードに乗り換える交通”であることを表す。式(5)は扇頂ノードにおける交通量保存則を表す。本モデルでは扇頂のノードを通過系統に乗り換えたまま通過するケースと、

別の系統を乗り継いで通過する場合を区別して乗り換え抵抗を適切に扱うため、発着を伴う本来のノードに加えて、接続する3つのリンクごとにダミーノードを加える。基本的な考え方は式(4)と同様であるが、4つのノードの間を、距離はゼロだが通過すると乗り換え抵抗がかかる仮想的なリンク $t_{o,n,n'}$ でつないでおり、式(5)のように定式化している。式(6)(7)は同一系統同一ノード内の乗り換えは発生しえないことを示している。

式(8)(9)(10)は出発地ノードにおける制約である。式(8)は、起点 o のOD交通量が起点 o に接続しているリンクのいずれかの系統を用いて出発することを表す。交通量 $x_{o,r,l}$ は起点 o 別に扱うことから、式(9)は起点に到着する交通量が存在しないこと、式(10)は起点での乗り換えが発生しないことを表す。式(11)は系統別に表された目的地への到着交通量がOD交通量 $q_{o,d}$ に等しいことを表す。式(12)はOD交通量 $q_{o,d}$ が、外生的に設定したOD需要 $Q_{o,d}$ を上回らないことを表す。

$$\sum_{l \in L_n^{arrv}} x_{o,r,l} + \sum_{r' \in R} y_{o,r',r,n} = g_{o,n,r} + \sum_{l \in L_n^{dep}} x_{o,r,l} + \sum_{r' \in R} y_{o,r,r',n} \quad (4)$$

$$\forall o \in N, n \in \{N | n \neq o, n \notin N^{ctr}\}, r \in R$$

$$\sum_{l \in L_n^{arrv}} x_{o,r,l} + \sum_{r' \in R} y_{o,r',r,n} + \sum_{n' \in N^{ctr}} t_{o,n',n} = g_{o,n,r} + \sum_{l \in L_n^{dep}} x_{o,r,l} + \sum_{r' \in R} y_{o,r,r',n} + \sum_{n' \in N^{ctr}} t_{o,n',n} \quad (5)$$

$$\forall o \in N^{ctr}, n \in \{N | n \neq o, n \notin N^{ctr}\}, r \in R$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{n \in N} y_{o,r,r,n} = 0 \quad \forall o \in N \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} a_{o,n,n} = 0 \quad \forall o \in N^{ctr} \quad (7)$$

$$\sum_{d \in N} q_{o,d} = \sum_{l \in L_o^{dep}} \sum_{r \in R} x_{o,r,l} \quad \forall o \in N \quad (8)$$

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

$$\sum_{r \in R} \sum_{r' \in R} y_{o,r,r',o} = 0 \quad \forall o \in N \quad (10)$$

$$\sum_{r \in R} g_{o,d,r} = q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (11)$$

$$q_{o,d} \leq Q_{o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (12)$$

c) リンクサービス設定のための制約

バスの系統は、いずれも分岐が存在せず、起点終点を一つずつ持つパスか起点終点が同一のサイクルであると

仮定する. 式(13)はその条件に対応する全てのノードでの接続次数の制約を表す.

式(14)は, リンクに交通モードが設定されている場合にのみ, 当該サービスを利用できることを表す. なお, 本研究では需要の減少期への適用を想定しているため, リンクの最大輸送容量は需要に対して十分な大きさが確保されていると仮定し, 同一OD間では全ての利用者が最も一般化費用の小さい一つの経路のみを選択している状況を考える.

交通サービスの運営には, 固定費用及び系統延長に応じた費用が必要であり, また移動に際しては所要時間や乗り換え抵抗が発生する. そしてこれらを全て金銭化して地域全体で足し合わせたものが, 地域のOD全体で一般化費用として負担される必要がある. この条件を式(15)で表す.

$$\sum_{a \in A_n^{node}} z_{r,a} \leq 2 \quad \forall r \in R \quad (13)$$

$$\sum_{o \in N} x_{o,r,l} \leq H \cdot z_{r,a} \quad (14)$$

$$\sum_{o,d \in N} c_{o,d} \cdot d_{o,d} \geq U + V \cdot \sum_{r \in R} \sum_{a \in A_l^{link}} z_{r,a} + \theta \cdot T_l^{rid} \cdot \sum_{o \in O} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} x_{o,r,l} + \theta \cdot T^{trs} \left(\sum_{o \in N} \sum_{r \in R} \sum_{r' \in R} \sum_{n \in N} y_{o,r,r',n} + \sum_{o \in N} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} t_{o,n,n'} \right) \quad (15)$$

d) 非負制約

各操作変数の定義域は以下のように定める.

$$z_{r,a} \in \{0,1\}, \quad (16)$$

$$c_{s_{o,d}}, c_{o,d}, q_{o,d}, g_{o,d,r}, x_{o,r,l}, y_{o,r,r',n}, t_{o,n,n'} \geq 0 \quad \forall o,d \in N, l \in L, r, r' \in R$$

(3) 二次錐制約問題への変形

前節での定式化における式(2), 式(15)の非線形制約を二次錐制約に変形する. 逆需要関数である式(1)を式(2), 式(15)に代入して変数 $c_{o,d}$ を消去し, 新たな変数 $q_{o,d}^{sq}$ を定義して, 式(17)(18)(19)のように変形する. 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.

$$q_{o,d}^{sq} \geq (q_{o,d})^2 \quad \forall o,d \in N \quad (17)$$

$$c_{s_{o,d}} = \frac{1}{2} \beta_{o,d} \cdot q_{o,d}^{sq} \quad \forall o,d \in N \quad (18)$$

$$\sum_{o,d \in N} C_{o,d} \cdot q_{o,d} - \beta_{o,d} \cdot q_{o,d}^{sq} \geq (\text{式(15)右辺}) \quad (19)$$

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. ただし式(17)は q_k^{sq} に下限を, 式(19)は q_k^{sq} に上限を与えており, それらを合せて考え

ると式(17)は実際には等式として成立する.

そして操作変数の定義域は以下ようになる.

$$z_{r,a} \in \{0,1\} \quad (20)$$

$$q_{o,d}, g_{o,d,r}, x_{o,r,l}, y_{o,r,r',n}, t_{o,n,n'}, q_{o,d}^{sq} \geq 0 \quad \forall o,d \in N, l \in L, r, r' \in R$$

(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(14), 式(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. 本研究では, 商用最適化ソルバーである Gurobi Optimizer 9.0.1 を用いて計算を行った.

(5) 外生パラメータの設定

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. $C_{o,d}$ は, OD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パラメータであり, 以下のように仮定した.

$$C_k = 2000[\text{円}] + \text{OD間距離}[\text{km}] \times 500[\text{円/km}]$$

$Q_{o,d}$ はOD需要, すなわち最大交通量を示す. 重力モデルを参考に, 各地点の需要規模とOD距離に応じて以下のように設定した. なお, 扇頂の需要規模は20から400の間で10刻みに動かし, それ以外の地点の需要規模は常に5に固定して計算を行った.

$$Q_{o,d} = \frac{\text{出発地の需要規模} \times \text{目的地の需要規模}}{\text{OD距離}^2} [\text{人}]$$

$\beta_{o,d}$ は逆需要関数の傾きであり, 以下の式で表される.

$$A_{o,d} = C_{o,d}/Q_{o,d} [\text{円/人}]$$

本研究では, リンクに交通サービスを設定する場合, 定員80人・表定速度15[km/h]のバスを, 毎日7時から22時までの16時間, 毎時片道6本ずつ運行すると仮定する. 交通サービスの費用に関する各パラメータは上記を念頭に設定する. H は各リンクの1日の輸送容量を示すパラメータであり, 前述の仮定より7680[人]に設定した. なおモデルの性格上 H は十分に大きな値である必要があるが, その条件は満たしている. θ は時間価値を示すパラメータであり, 3000 [円/h]に設定した. U はネットワーク全体を維持するために必要な1日当たりの費用(非現場業部門など)を, V_l はリンク l で交通サービスを運営するための1日当たりの費用(運転手の人件費や燃料費など)を表す. 実際の路線バス事業⁷⁾を参考に, 以下のように設定した.

$$U = 172,800[\text{円}]$$

$$V_l = \text{リンク長}[\text{km}] \times 38,400[\text{円/km}]$$

T_l^{rid} は, リンクごとの所要時間を示すパラメータであり, 以下のように設定した.

$$T_l^{rid} = \text{リンク長}[\text{km}] / 15 [\text{km/h}]$$

T^{trs} は, 乗り換え抵抗を示すパラメータである. 毎時6

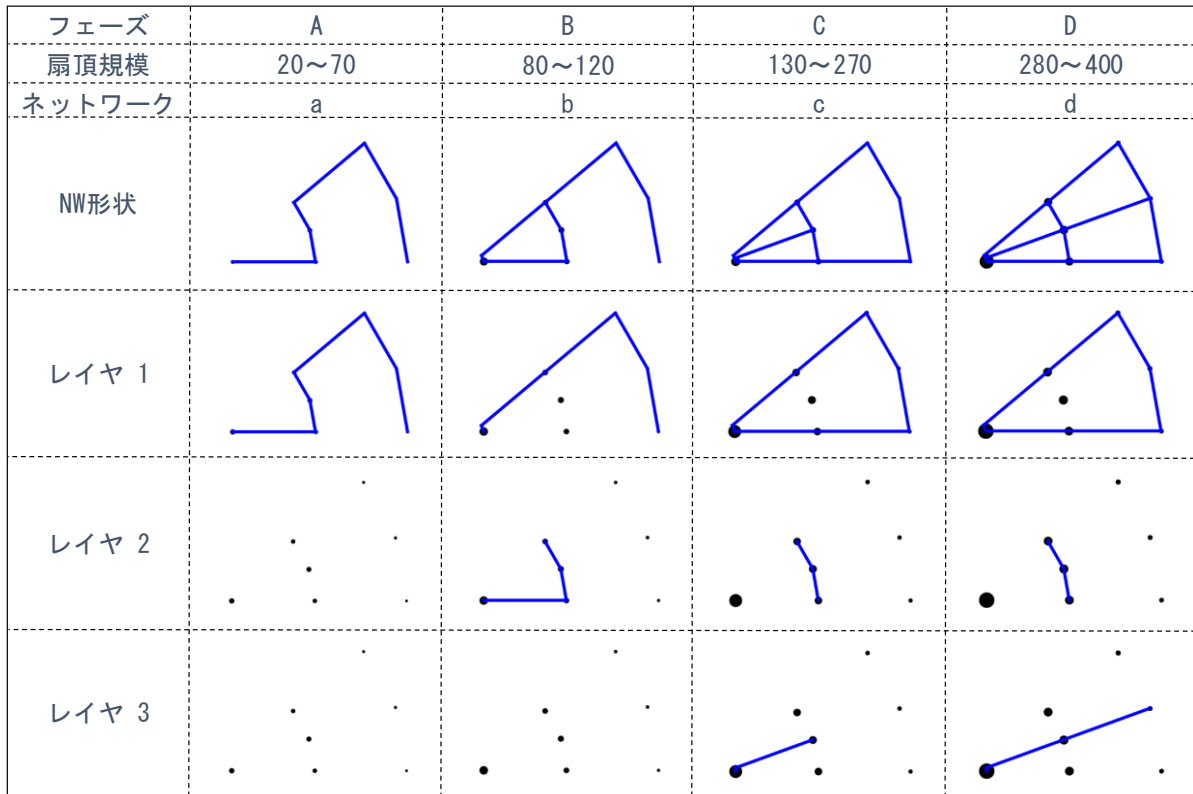


図-3 需要分布に応じた最適ネットワーク

表-4 各ネットワークの特徴

ネットワーク	a	b	c	d
路線系統数	1	2	3	3
リンク数	6	7	9	10
サイクル数	0	1	3	4

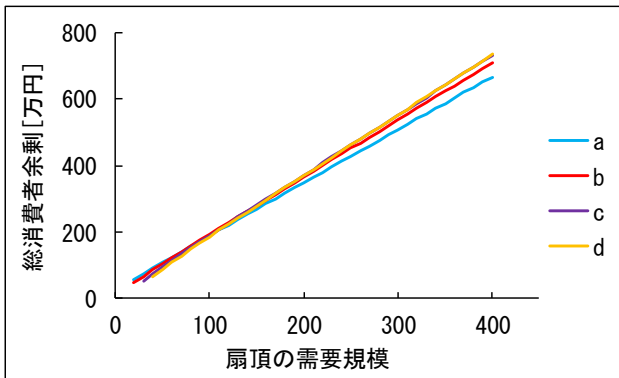


図-4 扇頂の需要規模に応じた総消費者余剰(各ネットワーク)

本であることより，乗り換え時の平均待ち時間は5分である．それを参考に以下のように設定した．

$$T^{trs} = 100[\text{円}] + \theta[\text{円}/\text{h}] \cdot 5/60[\text{h}]$$

4. 需要分布に応じた最適ネットワークの分析

(1) 需要分布に応じた最適ネットワークの変化

扇頂の需要規模を20 から400 まで10刻みで動かしながら最適計算を行った．その結果，選択される最適ネットワ

ーク形状の違いから，扇頂の需要規模は，4段階に区分できることが分かった．需要規模の小さいほうからフェーズA,B,C,D と呼び，各フェーズにおける最適ネットワークをネットワークa,b,c,d と呼ぶこととする．図-3は各フェーズの最適ネットワークa,b,c,dの形状，及びその構成単位である各路線系統を示している．また表-4には最適ネットワークa,b,c,dの特徴をまとめた．本研究で用いた仮想空間は7つのノードを持つため，全ノードに交通サービスを提供するには最低でも6本のリンクが必要である．すなわちネットワークaは全ノードをカバーできる最低限のネットワークである．また図-3，表-4からは，扇頂の需要規模に応じて系統数・リンク数・サイクル数がいずれも大きくなっていることが読み取れる．これはすなわち，扇頂の需要規模が大きくなるほど，最適ネットワークの冗長性が増すことを意味している．

図-4は，ネットワークa,b,c,dによって達成できる消費者余剰が，扇頂の需要規模に応じてどのように変化するかを示したものである．いずれのネットワークについても需要規模に応じて消費者余剰が単調に増加しているが，ネットワークによってグラフの傾きが異なっている．傾きは $a < b < c < d$ と，冗長性が小さいほど傾きが小さく，その傾きの違いが図-3に示したフェーズを生んでいる．またこの傾きの違いは，需要が大きい時にはネットワークの冗長化が消費者余剰を拡大させる効果を持ち，需要が小さい時には消費者余剰を縮小させる効果を持つ，ということを示している．

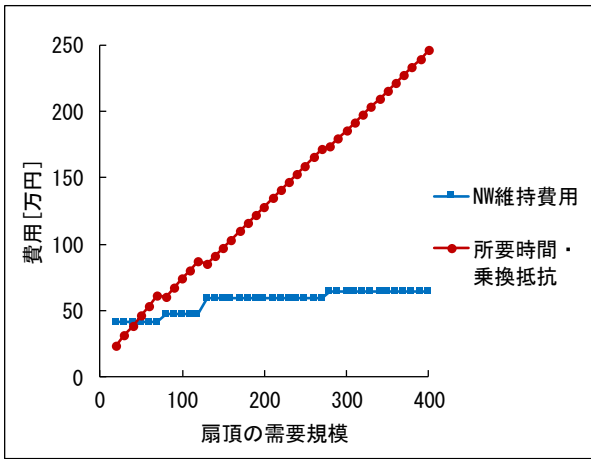


図-5 扇頂の需要規模に応じた費用(最適ネットワーク)

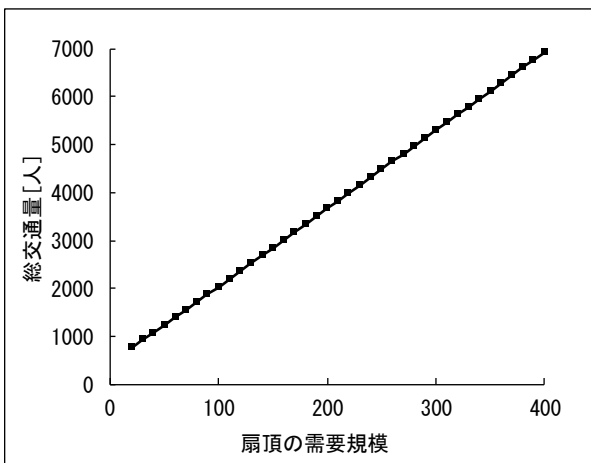


図-6 扇頂の需要規模に応じた総交通量(最適ネットワーク)

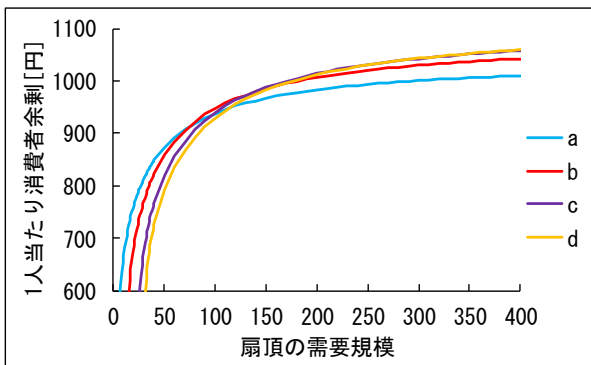


図-7 扇頂の需要規模に応じた1人当たり消費者余剰
(各ネットワーク)

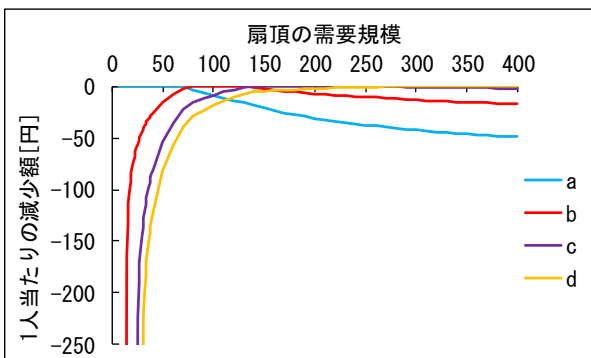


図-8 扇頂の需要規模に応じた1人当たり消費者余剰の減少額
(各ネットワーク)

(2) ネットワークの冗長性とその効果

消費者余剰の拡大効果は、冗長化がより短距離で乗りえの少ない経路を提供することに起因するものである。例えば、フェーズAのネットワークでは最大で6リンク(6km)の移動が必要なODペアが存在するが、フェーズDのネットワークでは最大でも2リンク(3km)で済む。乗り換え回数に関しても、フェーズBのネットワークでは乗り換え必須なODペアが6つであるのに対して、フェーズDのネットワークでは2つのみである。所要時間や乗り換えの削減はそれに関連する一般化費用の削減を意味し、それが支払額の削減と交通量の増加を促すことで、消費者余剰が拡大する。なお冗長なネットワークはより多くのリンクに交通サービスを設定しなければならず、そのために維持費用も大きくなる。しかし冗長化に伴う“所要時間や乗り換え抵抗に関する一般化費用の削減”がネットワークの維持に使える資金の拡充につながるため、ネットワークの冗長化自体が冗長なネットワークを支える構造となってい

この構造は図-5からも読み取ることができる。図-5は、扇頂の需要規模に応じた最適ネットワークを採った場合の、ネットワークの維持費用と所要時間・乗り換え抵抗に関する一般化費用を表したものである。ネットワークの維持費用は各フェーズ内では同一の最適ネットワークを採るために一定であるが、フェーズ境界では冗長化に伴うリンク数の拡大により増加する。一方で、所要時間・乗り換え抵抗に関する一般化費用は、需要規模の拡大に伴って概ね単調に増加するが、フェーズ境界では減少、もしくは増加の傾きが小さくなる。図-6に示すように需要規模の拡大に応じて交通量は単調に増加していることから、これは冗長化による所要時間や乗り換えの削減が要因である。以上より、フェーズ境界で、ネットワークの維持費用が増加し、所要時間・乗り換え抵抗に関する費用が減少していることはすなわち、冗長化に伴う“所要時間や乗り換え抵抗に関する費用の削減”がネットワーク維持に使える資金を増やしていることを意味し、冗長なネットワークの成立を支えていると言える。一方、冗長化による消費者余剰の縮小効果は、冗長化に伴うネットワーク維持費用の増大に起因するものである。前述のように、冗長化はそれそのものが冗長なネットワークを支える構造を持つが、交通量が大きくない場合には、所要時間・乗り換え削減による費用の縮小分が維持費用の増大分を下回る可能性がある。その場合、支払額の増加と交通量の削減が起き、消費者余剰は縮小すると考えられる。

(3) フェーズに応じたネットワーク変更に関する検討

図-7は、図-4に関連して、ネットワークabcdによって達成できる交通量1人当たりの消費者余剰が、扇頂の

需要規模に応じてどのように変化するかを示したものである。なおネットワークa,b,c,dは、扇頂の需要規模がそれぞれ6, 13, 24, 31 を下回ると必要なネットワーク維持費用が確保できず成立しない。そこで図-7では、便宜上、不成立となる場合の1人当たり消費者余剰をゼロと表示した。交通量1人当たりの消費者余剰は対数関数的に推移しており、いずれのネットワークについても需要規模が大きいための1人当たり消費者余剰の変動は小さいが、需要規模が小さい時には需要規模の縮小に応じて、1人当たり消費者余剰が著しく悪化することが読み取れる。また、図-8はネットワークa,b,c,dごとに、各需要規模における最適ネットワークを採った場合よりどれだけ交通量1人当たりの消費者余剰が悪化するかを示したものである。図-7と同様に、ネットワークが成立しない場合の交通量1人当たり消費者余剰はゼロとして計算した。扇頂の需要規模に対応する最適ネットワークを採らなかった場合の悪影響の大きさが、需要が大きい時と小さいときとは大きく異なることが読み取れる。すなわち、需要規模が大きい時にはフェーズに合わせて最適ネットワークを選択しなかったとしても、1人当たりの消費者余剰は大きくは変わらない。一方で、需要規模が小さい時にフェーズに対応した最適ネットワークを採らなかった場合には、1人当たりの消費者余剰が著しく悪化し、場合によってはネットワークを維持できない場合もある。フェーズDでネットワークaを採った場合の悪影響は決して小さくないが、フェーズAでネットワークdを採った場合の悪影響ははるかに大きいのである。

以上を踏まえると、図-7、図-8より、需要規模の小さい時にはいずれのネットワーク形状を採ったとしても利便性の悪化は避けられない一方で、需要の大きい時以上にどのネットワークを選択するかが利便性の大小に大きな影響を及ぼしている。需要規模の小さい時こそ、状況を正確に把握し、最適なネットワークを選択することが重要であると言える。

また例えば図-7、図-8から判断するに、扇頂の需要規模がおおよそ120（フェーズBとフェーズCの境界）を下回る場合に、各ネットワークが達成できる利便性に顕著な差が表れると言えそうである。図-3よりフェーズA,Bは放射状の路線系統を基本とした構成である一方で、フェーズC,Dは環状の路線系統を基本とした構成となっている。それを踏まえると、需要が大きい局面から需要が小さい局面に遷移する際には、ネットワーク形状を大きく変える必要性も示唆される。

5. まとめ

本研究では、大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模した扇形の仮想領域を対象に、バスネットワークを最適化（消

費者余剰を最大化）するモデルを用い、空間的な需要分布の変化に応じた交通システムの最適形状の変化、およびその特徴の分析を行った。それにより、以下の示唆を得た。

- ・需要規模が大きなフェーズであるほど、冗長性の大きなネットワークが最適ネットワークとして選択される。
- ・冗長性の大きなネットワークは、需要が大きなフェーズでは消費者余剰を拡大する効果を持つが、需要が小さなフェーズでは消費者余剰を縮小する効果を持つ。
- ・需要規模が小さなフェーズでは、たとえ最適なネットワーク形状を採ったとしても、需要規模が大きなフェーズと比較して利便性（1人当たりの消費者余剰）は小さくなる。
- ・需要規模が小さなフェーズでは、需要規模が大きなフェーズと比較して、フェーズに対応した最適ネットワークを採用するか否かが利便性（1人当たりの消費者余剰）の大小に大きな影響を及ぼす。
- ・需要が大きい局面から需要が小さい局面に遷移する際には、ネットワーク形状の大きな変更が必要とされる可能性がある。

ただし、本研究では複数の需要の空間分布の例として、扇形の仮想領域における扇頂部の需要規模を動かしながら計算と分析を行ったが、実際にはより多様な需要分布が考えられる。それらの検討も必要である。また、実際のバスネットワーク再編に際しては、既存ストックの存在、他交通モードとの取り合わせ・組み合わせ、施設配置との関係性など様々な要素が複雑に絡む。総合的に最適な公共交通システムの形状を解明するためには、そのような要素を考慮した議論が必要である。

参考文献

- 1) 菊地亮太, 室町泰徳: ネットワーク型コンパクトシティにおける公共交通維持のための都市構造に関する研究, 都市計画論文集, 51巻, 3号, pp.703-708, 2016.
- 2) 中島秀之, 野田五十樹, 松原仁, 平田圭二, 田柳恵美子, 白石陽, 佐野涉二, 小柴等, 金森亮: バスと小型相乗り交通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, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.I_875-I_888, 2015.
- 3) 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.
- 4) 小方登: 都市内公共輸送網のネットワーク分析 京都市営バスを例として, 人文地理, 32巻 6号, pp.493-503, 1980.
- 5) 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.
- 6) 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.

http://www.bus.or.jp/about/pdf/2019_busjigyo.pdf, (2020.10.4 参照).

7) 公益社団法人日本バス協会: 2019 年度版日本のバス事業,

(Received October 4, 2020)

IMPACT OF SPATIAL DISTRIBUTION OF DEMAND ON THE OPTIMAL SHAPE OF THE SUBURBAN TRANSPORTATION SYSTEM

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

In Japan, where the population is declining, it is important to reshape a regional structure to maintain the efficient daily life. “Compact city plus network” has been proposed as one promising direction, and there, it is important not only to consolidate land use in the neighborhood of the existing transportation network, but also to modify the public transportation network into a sustainable shape. In this study, we analyzed the effect of special distribution of demand on the optimal shape of public transportation networks in the suburbs of metropolitan areas. The existing intercity multi-modal network optimization model was reformed for suburban bus network around a railway station, and we calculated optimal network shape for various spatial distribution of exogenous demand. Based on the optimal network shapes and consumer surplus, we obtained useful findings for the reorganization measures of the public transportation system during the declining population period.