

145. 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

Theoretical Approach for the Selection of Public Transport Systems Considering Urban Density and Travel Distance

長谷川大輔*・鈴木 勉**
Daisuke Hasegawa* and Tsutomu Suzuki**

Diversification of local public transportation services for low amount of short travel is expected due to spread of ride sharing service, car sharing and others. The aim of this study is to clarify how the appropriate public transportation system changes according to density and travel impedance of passengers using an analytical model. First, we give a model that represents five typical transportation systems distinguished by presence of fixed routes and requirement both access and egress time, and then analyze influence on expense satisfied a condition of service level focusing on the effect by demand density and travel distance. Second, we investigate the current status of the introduction of local transportation in eastern Japan and compare with calculation result in model. We find out that the increasing the bus and DRT operated by local government and that effectiveness of car sharing in the area where introduced DRT.

Keywords: local public transportation, trip length, demand density, operation efficiency, demand responsive transit
地域公共交通, トリップ長, 需要密度, 運行効率, デマンド型交通

1. はじめに

わが国では 1960 年代頃からモータリゼーションが急速に進展し、ロードサイドショップの立地に代表されるような郊外型立地に依存した都市構造に変化してきた。その結果、都市内公共交通の利用者が減少し、都市内の移動を対象とした運行距離の短いバスなどが大きな影響を受けた。これにより、自動車を利用できない高齢者等の交通弱者にとっては生活が脅かされる問題が自治体の重要な課題として挙げられている。そうした現状から、近年地域公共交通ネットワークの再編が全国で行われている。これまでは主に利用者が乗車地点までアクセスし、定時定路線で運行する車両で移動するバスの路線網再編に焦点が当てられていた。

しかし、近年は利用者の需要に応じてルート変更するデマンド型タクシーの導入が多くの自治体で進められているだけでなく、Uber に代表されるライドシェアやカーシェアリングなど、様々な交通手段が新たな地域の公共交通サービスとして検討されている。これらは、乗降場所へのアクセス移動の有無、路線・運行ダイヤの有無などの運行形式の違いで既存の交通手段との差別化がされ、既存の交通手段の適用が困難であるトランスポーテーションギャップ¹⁾を埋める役割もあると考えられている。それらの新しい交通サービスは利用者の需要によって運行経路長が変わるため、需要密度や、対象とする領域の広さによって運行効率が左右されるという側面も持っている。そのため、利用者の密度、トリップ長によって有利不利が決定されるが、その具体的な条件については定量的に示されているとは言い難い。

需要密度と交通手段の関係に関する研究としては、新谷(1993)が公共交通機関を走行空間および輸送能力で分類し、需要密度の高さとトリップ長から各交通機関の適正な守備範囲を概念的に表している。²⁾また、石田ら(1999)は各交通

手段におけるコストを供給側と利用側の双方の観点から検証し、都市における有利領域を明らかにしている。³⁾しかしこれらの研究は鉄道と自動車に着目した都市間移動を対象としており、低需要密度、都市内短距離移動に関してはあまり着目されていない。

配送における合理性という観点では、物流分野における輸送中継施設(ハブ)の最適な階層構造について、家田(1997)や渡部・鈴木(2005)等の研究⁴⁾があるが、階層性の少ない旅客部門の直行・巡回といった運行方法の違いに着目した研究はほとんど見られない。また、長谷川・鈴木(2011)はデマンド型交通の有効性に着目し、低密な都市での優位性と、車両の不足による運行効率の急激な悪化、大型・小型車両の併用による運行効率性の向上など、デマンド型交通の運行効率性の特徴を定量的に示したが、路線の密度や形状などの考慮、移動需要の集中・分散の連続的表現などに課題が残る。⁵⁾

そこで本研究では、乗降場所へのアクセス移動の有無、路線・運行ダイヤの有無といった運行形式の異なる交通サービス 5 種類をモデル化し、需要密度および利用者の移動距離の違いが、各交通手段が一定のサービスレベルを実現するために必要な費用に対し、どのように影響するか分析する。そして、地域公共交通の導入現状の調査を行い、需要密度と移動距離における特徴を把握し、モデルの結果と比較することで、各交通サービスが有利になる需要密度・移動距離とその有利領域を理論的に導出することを目的とする。

2. 都市モデルによる交通サービスの優劣比較

本章では、まず都市モデルの概要と 5 種の交通サービスについて述べ、それぞれの運行方法の違いによる優劣を評価するための指標を定義する。そして、需要密度・利用者

*学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (University of Tsukuba)

**正会員 筑波大学システム情報系 (University of Tsukuba)

平均移動距離によって、一定のサービスレベルを実現するために必要なコストを定量的に明らかにする。

2.1 都市モデルの設定

無限平面上に需要密度 ρ (人/km²・hr)の利用者が一様に分布しているとする。利用者は出発地から様々な方向に向かうものとし、目的地までの移動需要は指数型分布に従って式(1)に表すように距離によって減衰するものとする。

$$q(x) = \lambda e^{-\frac{2}{d}x} \quad (1)$$

式(1)を x について無限遠までの範囲で平均した値を利用者の平均移動距離 d とすると、 λ は距離通減に関するパラメータで、 $\lambda = 2\rho/(d\pi)^2$ とすればよい。

2.2 交通サービスのモデル化

本節では、5つの交通サービスを定義し、それぞれの提供にかかるコストとそれによって実現されるサービスレベル(平均所要時間)を算出する。それぞれの概念図を図1に示す。

交通サービスは駅やバス停、カーシェアリングの駐車場のような交通拠点に対し、利用者が拠点までアクセス・イグレス移動が必要な**出向きタイプ**と、拠点より利用者の出発地まで車両が迎えに行く**出迎えタイプ**に分類することができる。一様に分布する拠点に対し、1)利用者が拠点まで出向き、拠点間を結ぶ路線を定間隔で運行する車両を利用する**路線型**、2)路線型同様に利用者が拠点までアクセス移動を行うが、拠点間は自由に移動が可能な**カーシェア型**、3)利用者の出発地から目的地まで乗合輸送を行う**デマンド型**、4)乗合を行わず利用者の出発地から目的地までをオンデマンドで輸送し、非定時・非定路線で運行を行う**タクシー型**、さらに5)自家用車や自転車・徒歩を想定し、出発地から目的地まで直接向かうことのできる**自前型**の計5種を想定する。路線型とカーシェア型が出向きタイプ、デマンド型とタクシー型が出迎えタイプに分類され、5種のうちいずれか1つを採用することを想定する。

2.3 交通サービス別の提供コストと利用者平均所要時間

本節では、各交通サービスを提供した際のコストと、それによって実現できる利用者の所要時間を算出する。交通サービス i はそれぞれ一様に拠点が存在し、拠点と出発地もしくは目的地間のアクセス/イグレス部分の移動距離 d_{ai} と、出発地と目的地間の移動距離 d_{ci} が存在する。

1) 路線型

利用者は密度 b_1 (箇所/km²)で配置された最寄りの拠点まで単位距離当たりアクセス時間(速度の逆数) t_{a1} (hr/km)でアクセス移動(図1.....)し、拠点間を結ぶ路線上に、一定の運行間隔 f_1 (hr)で来る車両に乗って、単位距離当たり車両所要時間 t_{c1} (hr/km)で目的地最寄の拠点まで移動(→)し、そこから目的地まで再度 t_{a1} でイグレス移動を行う。利用者は目的地の最寄拠点まで最短経路を選ぶものとし、乗換にかかる時間、停車の際の加減速にかかる時間は考えない。利用者の平均アクセス・イグレス距離 d_{a1} (km)は拠点が一様に六角格子状で分布するものとし、正六角形領域の中心までの平均距離は、円盤状の領域から円の中心までの距離と大差ないため、これで近似する。

$$d_{a1} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{b_1}} \quad (2)$$

車両移動距離 d_{c1} (km)と路線密度 l (km/km²)は利用者平均移動距離 d (km)、拠点密度 b_1 より以下のように求める。

$$d_{c1} = \alpha d \quad (3)$$

$$l = \beta \sqrt{b_1} \quad (4)$$

ここで α はネットワーク移動距離における定数項である。ネットワーク距離はその形状によって当然程度は異なるが、直線距離に対して比例関係にある α とする。ネットワークが密になるほど、 α の値は1に近づく。また、 β はネットワーク密度における定数項である。本研究では、路線同士の交差点である拠点を六角格子状で一様配置(よって路線網は三角格子状で結ばれる。)と定義し、 α は中心角 60° の扇形と正三角形の面積比、 β は渡部(2006)⁹⁾で明らかにされている三角格子網の総延長距離より

$$\alpha = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \approx 1.209 \quad (5)$$

$$\beta = 3\sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{3}} \approx 3.233 \quad (6)$$

とする。運行頻度 f_1 は路線密度 l の走行時間を車両密度 n_1 (台/km²)で除したものとし、この半分が平均待ち時間として発生するものとする。

$$f_1 = l t_{c1} / n_1 \quad (7)$$

利用者の平均所要時間 T_1 (hr)は

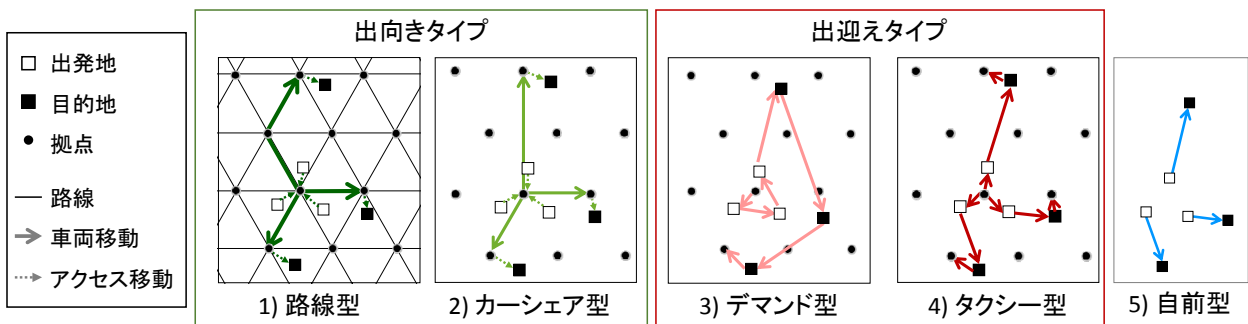


図1 5種類の交通サービス

$$T_1 = d_{c1}t_{c1} + d_{a1}t_{a1} + f_1/2 \quad (8)$$

となり、路線型の提供コスト C_1 (円/hr)は

$$C_1 = lCL_1 + b_1CB_1 + n_1CN_1 \quad (9)$$

となる。 CL_1 (円・km/hr)は路線、 CB_1 (円・箇所/hr)は拠点、 CN_1 (円・台/hr)は車両の時間あたりのコストパラメータである。路線密度 l は式(4)によって拠点密度から求められ、総コストは拠点密度と車両密度によって決定される。

2) カーシェア型

利用者は密度 b_2 (箇所/km²)で配置された拠点に対して、路線型と同様に単位あたり時間 t_{a2} (hr/km)でアクセス移動(→)を行うとし、その距離 d_{a2} (km)は式(2)と同様に、

$$d_{a2} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{b_2}} \quad (10)$$

とする。車両は単位あたり車両所要時間 t_{c2} (hr/km)で目的地の最寄拠点まで直線距離で向かう(→)ものとし、その移動距離 d_{c2} (km)は利用者の平均移動距離 d (km)とする。

また、車両は乗り捨て可能とし、車両を元の拠点に戻す時間は考慮しない。車両は多方面から相互に到着するものとして、利用者が車両を割り当てられるまでの待ち時間 f_2 (hr)は一人あたりの車両利用時間に需要密度を乗じた累計利用時間を車両台数 n_2 (台)で除したものとする。

$$f_2 = \rho d t_{c2} / n_2 \quad (11)$$

カーシェア型利用者の平均所要時間 T_2 (hr)および提供コスト C_2 (円/hr)は以下ようになる。

$$T_2 = d_{c2}t_{c2} + d_{a2}t_{a2} + f_2/2 \quad (12)$$

$$C_2 = b_2CB_2 + n_2CN_2 \quad (13)$$

3) デマンド型

利用者は密度 b_3 (箇所/km²)で配置された拠点から一定間隔で運行する車両に出発地まで単位車両所要時間 t_{c3} (hr/km)で迎えに来てもらい、目的地まで移動(→)する。その際、同乗する他の利用者が出発地、目的地を経由するものとし、出発地の巡回が完了した後に目的地を巡回する。利用者は運行間隔と他の利用者が出発地に迂回する分だけ余計な乗車時間がかかる。

利用者に乗せた後の利用者が出発地-目的地を結ぶ巡回路長 $2d_{c3}$ (km)はBHH定理⁹⁾により求める。拠点別の領域面積(拠点密度 b_3 の逆数)に需要密度 ρ を乗じた値を乗車人数とする。巡回する領域は、出発地については拠点別領

域、目的地は利用者平均距離 d を半径とした円の領域とみなせば、巡回距離は式(14)に収束する(ただし $k=0.765$)。

$$2d_{c3} = \frac{k\sqrt{\rho}}{2} \left(\frac{1}{b_3} + \sqrt{\frac{\pi d^2}{b_3}} \right) \quad (14)$$

目的地までの平均乗車距離 d_{c3} (km)は(12)式の半分である。車両の運行間隔 f_3 (hr)は車両の巡回路長 $2d_{c3}$ を車両所要時間 t_{c3} で移動した際の送迎時間を、車両台数 n_3 (台/km²)に拠点密度 b_3 を乗じたもので除したものと、その半分を利用者の平均待ち時間とする。

$$f_3 = 2d_{c3}t_{c3} / b_3n_3 \quad (15)$$

よって、デマンド型利用者の平均所要時間 T_3 (hr)および提供コスト C_3 (円/hr)は以下ようになる

$$T_3 = d_{c3}t_{c3} + f_3/2 \quad (16)$$

$$C_3 = b_3CB_3 + n_3CN_3 \quad (17)$$

4) タクシー型

利用者は密度 b_4 (箇所/km²)で配置された拠点から車両に出発地まで迎えに来てもらい、そこから目的地まで距離当たり時間 t_{c4} (hr/km)で移動(→)するものとする。乗合は行わず、利用者を出発地から目的地まで直接輸送する。ライドシェアサービスも同様の類型ととらえれば、住民である一般のドライバーが利用者の送迎を行うといったタクシー型の拠点密度が高いケースと考えることができる。拠点から出発地、目的地から最寄拠点までの距離 d_{a4} (km)は、式(2)および式(10)と同様に、拠点密度 b_4 から以下の式で求める。

$$d_{a4} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{b_4}} \quad (18)$$

目的地までの乗車距離 d_{c4} は利用者の平均移動距離 d と同じとする。車両は利用者に対して先着1名ずつ割り当てられ、 n_4 (台/km²)の全ての車両が利用されている場合、待ち時間 f_4 (hr)が発生する。拠点から出発地、目的地から最寄拠点までの距離、距離当たり車両所要時間 t_{c4} で移動した際の送迎時間を、車両台数 n_4 (台/km²)に拠点密度 b_4 を乗じたもので除したものと、その半分が利用者の待ち時間として発生するものとする。

$$f_4 = (2d_{a4} + d_{c4})t_{c4} / b_4n_4 \quad (19)$$

よって、タクシー型利用者の平均所要時間 T_4 (hr)および提供コスト C_4 (円/hr)は以下ようになる。

表1 交通サービス*i*別のパラメータの設定

			1)	2)	3)	4)	5)
			路線型	カーシェア型	デマンド型	タクシー型	自前型
T_i	利用者所要時間	(hr)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
t_{ai}	アクセス速度逆数	(hr/km)	1/3	1/3	-	-	-
t_{ci}	車両速度逆数	(hr/km)	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
CL_i	路線コスト	(円・km/hr)	90	-	-	-	-
CB_i	拠点コスト	(円・箇所/hr)	50	100	100	100	200
CN_i	車両コスト	(円・台/hr)	5000	2500	2500	2500	2500

$$T_4 = d_{c4}t_{c4} + f_4 / 2 \quad (20)$$

$$C_4 = b_4CB_4 + n_4CN_4 \quad (21)$$

5) 自前型

利用者自身が車両を保有し、直接目的地まで単位車両時間 t_5 (hr/km)で向かう(→)。よって自前型利用者の平均所要時間 T_5 (hr)は以下の通りである。

$$T_5 = dt_{c5} \quad (22)$$

車両台数 n_5 (台/hr)は需要密度に移動時間を乗じたものとし、車両ごとに保管場所である拠点コストがかかるものとする。よって車両台数 n_5 、提供コスト C_5 (円/hr)は以下のようになる。

$$n_5 = \rho T_5 \quad (23)$$

$$C_5 = (CB_5 + CN_5)n_5 \quad (24)$$

3. コストを最小化する交通サービス

モデル分析に用いるパラメータを表1に示す。2章で求めた式から各型について T_i をパラメータとして与え、 f_i の式を解くことによって車両台数 n_i を求める。利用者所要時間 T_i は 1/2(hr)とし、平均 30 分のサービスレベルを実現するコストを求める。自動車運送事業経営指標⁹⁾を参考に、時間あたりのパラメータ値を設定する。拠点密度 b_i を変化させた場合の提供コスト C_i を需要密度 ρ で除した、一人当たりコスト c_i (円/hr・人)を図2に示す。これより、

① 拠点密度 b_i を増加させると、アクセス距離 d_{ai} および拠点ごとの利用者の減少によって平均所要時間の減少が

見られるが、 c_i に関して最小となる最適な拠点密度が存在する。ただし自前型の車両数 n_5 と拠点密度 b_5 は需要密度によって一意に決まるため、値は変化しない。

② 最適な拠点密度は、アクセス距離の増加による平均所要時間の増加量が大きい出向きタイプの交通手段の方が高い値を示す。

③ 路線型は移動距離に対してコストが通増的である一方、他の交通手段は通減的である。利用者の移動距離が短い場合デマンド型が有利だが、距離が長くなるにつれてカーシェア型が有利となり、 d の増加分による待ち時間への影響の少ないデマンド型が再び有利となる。

④ 路線型は需要密度の変化を受けないため、需要が高密の際の一人当たりコストが小さくなり有利となる。

⑤ 他の交通手段は需要の増加に対して一人当たりコストが指数的に減少するが、高密の場合は自前型に次いでカーシェア型が有利となる。

さらに、 ρ と d の値を変化させ、 c_i が最小となる交通手段を、自前型も考慮し、自家用車が利用可能な場合と、自家

用車を考慮し、自家用車が利用可能な場合と、自家

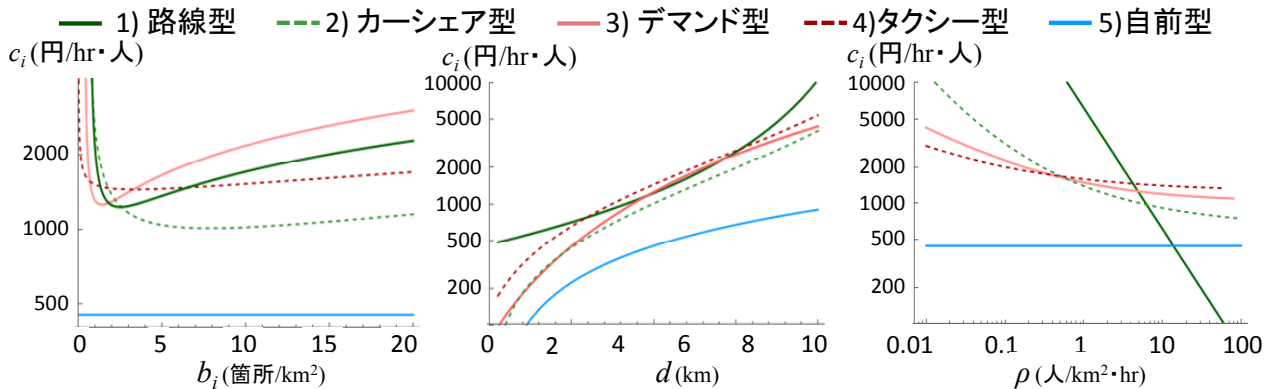


図2 拠点密度 b_i と一人当たりコスト c_i の関係 ($\rho=5, d=5$)

図3 利用者平均移動距離 d と一人当たりコスト c_i の関係 ($\rho=5$)

図4 需要密度 ρ と一人当たりコスト c_i の関係 ($d=5$)

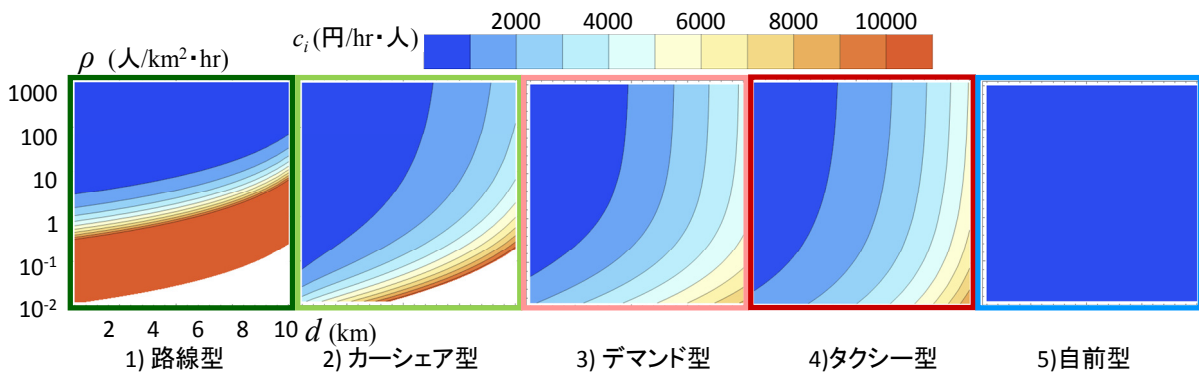


図5 利用者平均移動距離 d 、需要密度 ρ と一人あたりコスト c_i の関係

- 用車が利用できない場合について図6に示す。これより
- ⑥ 自前型の有利領域が大きく、自家用車の優位性が示されたが、需要が高密な場合は路線型が有利となる。
 - ⑦ 自前型を考慮しない場合、需要が低密になるにつれ、長距離におけるカーシェア型、短距離におけるデマンド型の有利領域が出現する。
 - ⑧ 需要がさらに低密の時はタクシー型が優位となるが、移動距離が長い場合は一人あたりの所要時間が増え車両の回転率が悪化するためにデマンド型が有利となる。
- これらの結果から、相乗り可能なライドシェアサービスや、乗捨て可能なカーシェアリングサービスなど大都市で導入されているサービスが、需要密度が時間当たり1~5人程度の地域においても有利となりうる事がわかる。
- また、図7は単位コストの感度分析を目的にカーシェア型・デマンド型・タクシー型の拠点コスト CB_2, CB_3, CB_4 、および車両コスト CN_2, CN_3, CN_4 の値を変化させた場合の有利領域への影響を分析したものである。これより
- ⑨ 拠点コストの増減は、図2に示すように拠点数の多いカーシェア型への影響が大きい一方、車両のコストの減少による影響はデマンド型が大きい。

以上の結果より、需要が低密である場合はカーシェア型・デマンド型のコスト差が小さく、わずかなコスト変動で双方の優位性が変わる点が示された。

4. 地域公共交通導入の実態と理論的モデル結果との比較

本章では、東日本地域における自治体が主体となってい

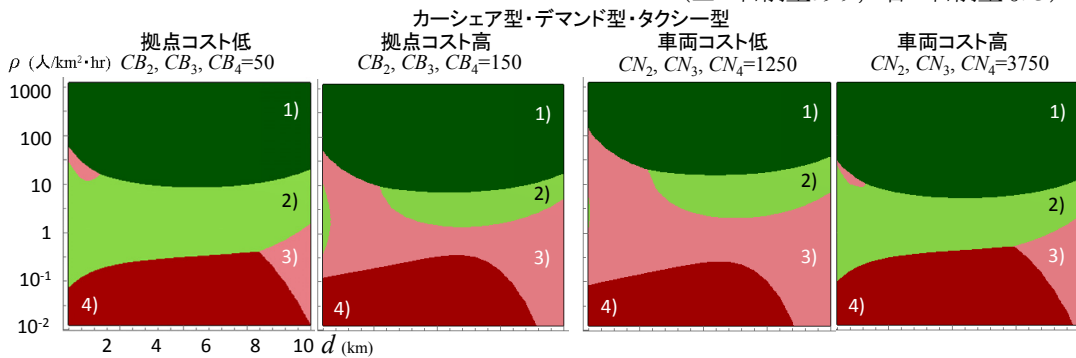
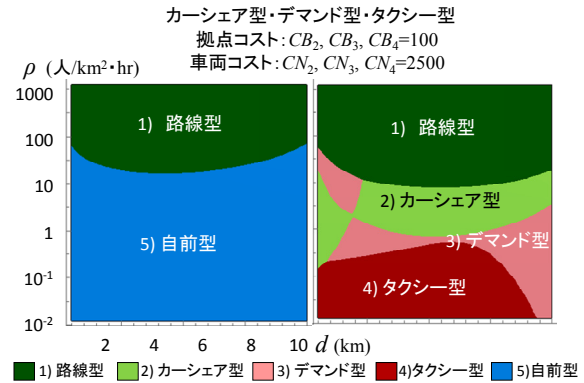
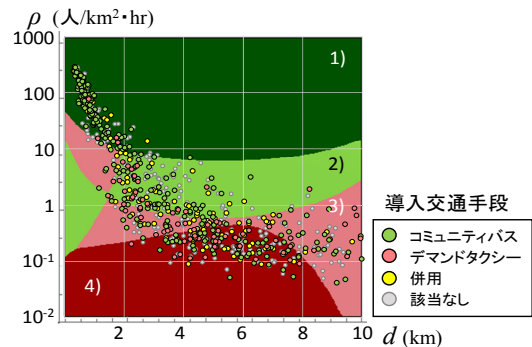
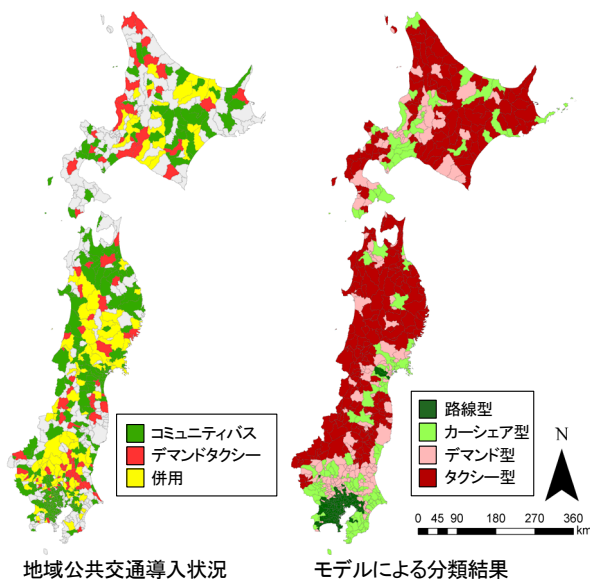


表2 地域公共交通サービス別の移動距離 d 、需要密度 ρ の平均値

	件数	移動距離 d (km)	需要密度 ρ (人/km ² ・hr)
コミュニティバス	303	3.75	40.15
デマンドタクシー	87	5.29	2.19
併用	117	4.51	6.23
該当なし	258	5.67	9.79



る地域公共交通の導入状況を把握し、導入手段別に需要密度と移動距離の値を比べた上で、前章で導出した需要密度・移動距離別の交通サービスの有利領域との比較を行う。

4.1 地域公共交通導入状況

自治体が主体となって運行するコミュニティバス・デマンドタクシーに関し、東日本14都道府県・734自治体に対してインターネット・文献による調査を行った結果を図8に示す。導入が確認できた件数は、コミュニティバスが371件、デマンドタクシーが193件あり、うち、両方が併用されている例が115件確認された。2011年の日本経済新聞社による調査¹⁰⁾に比べ、コミュニティバスが199件、デマンドタクシーが117件増加していることがわかり、自治体における地域公共交通が多様化していることがわかる。

4.2 モデル結果との比較

前章で示した移動距離 d ・需要密度 ρ と提供コストの関係から、各交通サービスの有利領域と各自治体の導入実績との対応を調べる。需要密度と移動距離は1kmメッシュごとに算出し、市区町村別に集計し平均値を求める。1kmメッシュ k の一時間あたり需要密度 ρ_k は以下の式で算出する。

$$\rho_k = P_k (Day/7)(Hour/24) \quad (25)$$

P_k はメッシュ k の2010年総人口(人)、 Day は週当たり外出日数、 $Hour$ は一日当たり外出時間であり、最寄の病院・スーパーには1日ずつ1時間の外出を想定し、 $Day=2$ 、 $Hour=1$ と設定する。メッシュ k の平均移動距離 d_k は各メッシュの代表点から、病院¹¹⁾ 8,657点及びスーパー¹²⁾ 41,351点のうち最寄りの点までの直線距離をGISを用いて算出し、それらの平均とする。表2は島嶼部を除く交通手段種類別の移動距離、需要密度の平均値である。これを見ると、コミュニティバス導入自治体においては、平均移動距離が短く、需要密度も40人/hr・km²と高密度である一方で、デマンドタクシー導入自治体は長移動距離、低需要密度となっている。

さらに、図9は各自治体の移動距離・需要密度の平均値を図6の自前型を考慮しない場合にプロットしたものであり、その地理的分布を図8右に示す。需要密度の均一性を仮定したモデルを用い、移動距離も推定値であるため限界はあるが、コミュニティバスとデマンドタクシーの境目は概ね1)2)と3)4)の境目と適合している。

分類した774自治体のうち、路線型には154箇所が含まれるが、首都圏および宮城県仙台市といった人口密度が高く、目的地となる施設も近距離にある地域が該当する。これらの地域では実際に鉄道・バス路線が高密度に整備されている。カーシェア型には千葉・埼玉・神奈川・宮城などの路線型に準ずる需要密度の地域および需要密度が低い、移動距離が長い北海道の一部地域等148箇所が分類されるが、現段階でカーシェア型の地域公共交通が実現しているところはなく、コミュニティバスやデマンドタクシーが混合している。デマンド型には、北関東、宮城県仙台市周辺、北海道央など188箇所が分類され、カーシェア型・デマンド型に分類された都市のうち、108箇所がデマンドタクシー(うち62箇所はコミュニティバス併用)が既に運行され

ており、適合性が確認できる。タクシー型は287箇所が分類され、東北地方に多く分布しているが、図8左と比較すると、実際にはコミュニティバスが導入されている地域が多い。H27年地方バス路線維持費の人口一人当たりの金額¹³⁾を見ると、青森県は全国で3位、秋田県が7位で多額のコストがかかっており、タクシー型の導入によるコスト削減可能性が推察される。また、中山間地域など可住地が限られ、実質的な需要密度が高くなる場合を考慮した分析を行うことで、より説明力を高めることが可能と思われる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、多様化の進む地域公共交通の優位性の理論的考察を目的として、需要密度と利用者の移動距離の関係から、各交通手段が一定のサービスレベルを実現するためのコスト変化の基礎的条件を導出し、その結果を現実の導入地域と比較し、以下の結論を得た。

- ① 高需要密度では路線型、低需要密度ではタクシー型が優位であり、また、カーシェア型とデマンド型がその中間に位置づけられ、移動距離が長くなるほど、デマンド型のシステムの優位性が拡大する。
- ② 地域公共交通導入の実態を調査した結果、自治体別の需要密度・移動距離の特徴として、コミュニティバス導入地域では高需要密度・短距離移動であるのに対し、デマンド型導入地域では逆の傾向が見られた。
- ③ 各交通サービスの有利領域と自治体別の値との比較を行い、路線型・デマンド型交通導入地域におけるモデルの適合性を部分的に確認できた。

パラメータの現実の条件との対応、容量を考慮した考察、不均衡な需要分布への対応などが今後の検討課題である。

謝辞

本研究は、大林組研究助成、筑波大学社会工学コモンズデータバンクプロジェクト、JSPS 科研費 26560162、16J02064 の研究成果の一部である。匿名の査読者には貴重な助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤晃・竹内伝史(1979):『新版都市交通と都市計画』, 技術書院
- 2) 新谷洋二(1993):『都市交通計画』, 技報堂出版
- 3) 石田東生・谷口守・鈴木勉・古屋秀樹(1999):「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**(1), 14-25.
- 4) 家田仁(1997):「Hub-Spokes/Point-to-Point や集約型/直行型輸送など階層的輸送システムの均質無限平面上における定式化と解法」,『土木計画学研究・論文集』, **14**, 773-782.
- 5) 渡部大輔・鈴木勉(2000):「規模の経済性を考慮した階層的集集・配送輸送システムに関する研究」,『都市計画論文集』, **35**, 1027-1032.
- 6) 長谷川大輔・鈴木勉(2011):「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**(3), 817-822.
- 7) 腰塚武志・小林 純一(1983):「道路距離と直線距離」,『都市計画論文集』, **18**, 43-48.
- 8) 渡部大輔(2006):「近接性からみたネットワーク形態解析と輸送システム最適化に関する数理的研究」, 筑波大学大学院博士論文, 2006.
- 9) Bearwood, J., Halton, J.H., and Hammersley, J.M. (1959): The Shortest Path Through Many Points, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, **55**, 299-232.
- 10) 日本経済新聞社産業地域研究所(2012):『全国都市のサステナブル度評価』.
- 11) 株式会社ウェルネス(2011):『全国病院一覧』.
- 12) 商業界(2013):『日本スーパー名鑑』.
- 13) 日本バス協会(2016):『日本のバス事業2015』.