

# 時空間ネットワークを用いた地域公共交通網の 運行ダイヤを考慮した性能評価に関する研究

長谷川 大輔\*・嚴 先鏞\*\*

## Evaluation Method of Local Public Transportation Network Performance Using Time-Space Network

Daisuke HASEGAWA\*, Sunyong EOM\*\*

It is necessary to understand the current performance of the public transportation system considering not only the cover ratio but also the rapidity to support the travel demands considering timetables for planning public transportation. This study aims to evaluate the convenience of the public transportation network for daily travel demands considering the connectivity of timetables. First, the average travel speed captures the degree of match between travel demand and route geometry. Second, the dispersion of travel time quantifies the convenience of public transportation, and the higher the frequency, the smaller it becomes.

**Keywords:** 地域公共交通 (local public transportation), 利便性 (accessibility), 速達性 (quick - deliverability), 時空間ネットワーク (time-space network)

### 1. はじめに

近年、我が国が目指す都市空間像としている「コンパクト・プラス・ネットワーク」の実現に向けて、2020年6月より、公共交通のマスタープランとして位置づけられる地域公共交通計画が、原則として全ての自治体で策定が求められるようになった。そこでは、昨今のインフラ整備・維持コストの増大や公共交通の衰退の状況(国土交通省, 2019)から、費用を抑えつつ交通空白地帯を効率的に無くすハブ・アンド・スポーク形状を目指すケースが散見される。しかし、新たな計画によってスポーク間のアクセシビリティが悪化する可能性もあり、都市内移動に対し、現状と比べ速達性がどの程度向上したか、待ち時間の少ない運行ダイヤになるのか、といった総合的な利便性に関する定量的具体性が不足している。

都市構造と交通に関して、これまで多くの既往研究が存在する。人口、施設分布に対する停留所、路線の密度・配置によって評価・設計を行う手法(河

内ら, 2016;長谷川・鈴木, 2019)が提案されているが、その多くは運行ダイヤ接続によって発生する待ち時間は考慮されていない。

そうしたダイヤの接続性を考慮するために、時空間ネットワークを用いた分析が行われており、ダイヤの最適化に用いられる研究(Yang, et, al. 2020)が行われている。また、赤星ら(2012)において、低頻度で運行される過疎部の公共交通に着目した、県単位での移動可能性の評価を行っている。

そこで本研究では、市区町村単位での評価に焦点を当て、時刻表データを基に、主たる地域公共交通である路線バス含めた時空間ネットワーク(以下、時空間NW)を構築し、地域内の日常移動需要に対して地域公共交通網の路線形状と運行ダイヤが、どれだけ性能の高いネットワークになっているかを評価し、その改善のために知見を得ることを目的とする。その際、これまでの研究では議論されてこなかった“車両密度”に着目した考察を行う。都市内を

---

\* 正会員 東京大学生産技術研究所 (The University of Tokyo)  
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 E-mail : hasega60@iis.u-tokyo.ac.jp

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

走行する公共交通の車両数を集計し、その多寡と都市の地域性、および公共交通の利便性・速達性との関係性について考察する。

そのために、2章では測定に用いる時空間NWの考え方について述べる。次に3章では時空間NWを用いて計測した市区町村別の車両密度と人口密度との関係について分析する。4章では都市内の日常的な移動需要について、その推定方法を説明し、5章では移動需要に対する公共交通性能を評価するための需要捕捉率、速達性、利便性の3つの指標について説明し、評価結果について車両密度との関係も踏まえて考察する。最後に6章で本研究を総括する。

## 2. 利用データと時空間ネットワークの構築

### 2.1. ネットワークの構築

時空間NWはX軸、Y軸の空間軸とZ軸の時間軸で構成される三次元のネットワークである。図1に示す例を用い、時空間NWを構成するノード、リンクについて説明する。図1は停留所（鉄道駅やバス停などの車両に乗車できる地点を総称する。）AからBで乗換を行いCに向かう例である。停留所Aを出発地ノード(A,8:00)から、Aの路線1を通る車両1-1に発車ノード(A-1,8:00)より、停留所Bに移動して(B-1,8:30)に到着する。そして、Bで路線1から2に5分の乗換移動を行い、路線2のホーム(B-2,8:35)まで移動する。この時、路線2の車両2-1はすでにBを発車しているために、次の車両2-2に5

分の待ち時間の後に乗車する(B-2,8:40)。そしてCに8:50に到着(C-2,8:50)する。Aを9:00に出発する場合はCの乗換時15分の待ち時間があるため、Dに10:00到着となる。以上のように、時空間NWのノードは各停留所を通る路線別の車両一便ごとの到着・発車ノード、各停留所に設定する経路探索時の出発地・目的地ノード、車両到着ノードから乗換可能な路線に移動した、ホーム到着ノードから構成され、それぞれ駅と路線、時間情報を持つ。そして、ノード間には、後の時間への有向リンクが接続され、このうち、図1において実線で示されるリンクは移動の時間を、点線で示されるリンクは物理的な移動は行わない待ち時間を示しており、それぞれ起点と終点の時間差を重みとして付与している。ただし、出発到着リンクは重みが0の仮想リンクである。

### 2.2. ネットワークの構築のための利用データ

経路探索エンジン「駅すばあと」で探索に用いられる2020年3月版データベースから、全国の鉄道・

表1 時空間ネットワーク概要

	停留所数	路線数	走行リンク数
鉄道	9,080	1,067	1,508,648
航空	88	15	2,235
フェリー	522	163	5,101
高速バス	2,421	571	62,445
連絡バス	771	329	24,937
路線バス	156,270	24,846	9,439,914
合計	169,152	26,991	11,043,280

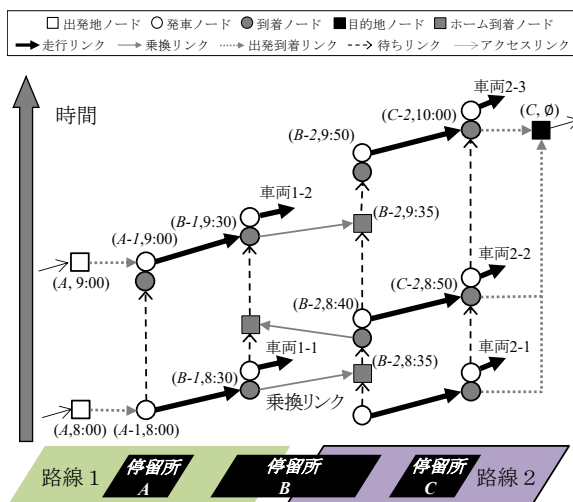


図1 乗客の移動例

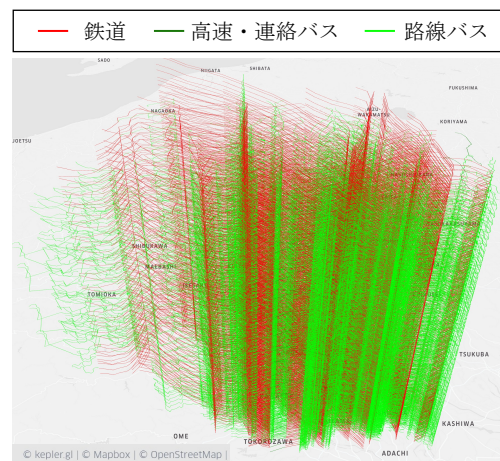


図2 可視化した時空間ネットワーク

路線バス・高速バス・フェリー・航空便の停留所、停留所間の時刻表データ、乗換時間データを取得した。表1に取得した停留所、路線数、時刻表に記載された走行リンク数を駅すばあとの交通手段別に示す。停留所数は約17万点、車両の移動リンクの合計は約1100万であり、停車リンクや乗換リンク等も含めたすべてのリンクの合計は約9800万本である。ただし、乗換時間は鉄道駅間、鉄道駅と路線バス停留所間、同一会社で乗換可能なバス停間の乗換時間のみ取得可能であったため、異なる会社の路線バス停留所間に関しては、300m以内のバス停同士が含まれる場合のみ乗換可能とし、バス停間の直線距離を4.8km/hで移動するものとした。また、図2はネットワークの埼玉県部分を、垂直方向で時間軸を表した三次元形式で可視化したものである。図の右側が埼玉県南東部の都心に近い地域であり、重なるリンクの数が多く、高頻度な路線が可視化されている。

以上のように構築した時空間NWにより駅間の所要時間を出発の時間帯別に求めることが可能となる。

### 3. 都市の密度と車両密度の関係

本章では、都市における公共交通の車両の多寡に着目した分析を行う。都市の密度が高いほど、高密な路線、かつ高頻度の公共交通網が整備されており、出発する車両も必然的に多くなっていることが考えられる。そこで、公共交通の便数を市区町村ごとに

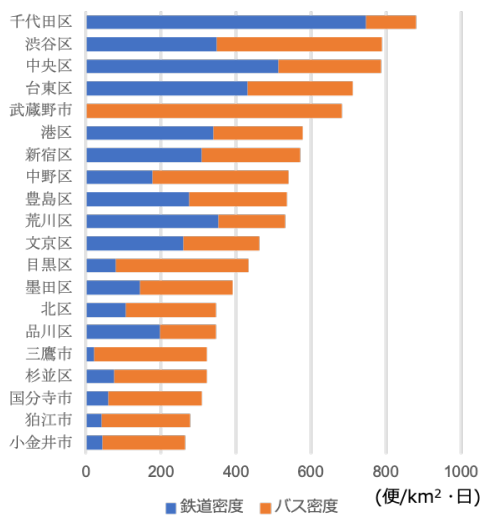


図3 車両密度の高い市区町村

集計し、人口からみた都市の密度との関係性を確認する。

#### 3.1. 市区町村別車両本数の測定

時空間NWを用い、出発地と到着地が市区町村内に含まれる停留所間において、2020年3月1日4:00~翌4:00までの24時間で運行される車両について、その便数を集計する。なお、本章で行った車両数の集計は全国の市区町村(東京23区、および政令指定都市を1市とした市町村)のうち、時刻表データが存在した1058箇所を対象とした。図3は市区町村別の可住地面積1km²あたりの車両密度の高い20市区町村を示している。全て東京都の自治体であり、最も車両密度が高いのは東京駅や大手町駅のある千代田区で、次いで渋谷区、中央区、台東区と鉄道や地下鉄のターミナル駅のある、都心の自治体が上位となった。

よって、車両密度は、通勤通学需要の高い、就業者・就学者の人数である昼間人口との関係性が高いことが予想される。それらの関係を概括的に把握するために、説明変数を昼間人口密度、従属変数を市区町村内の車両密度とし、最小二乗法を用いた単回帰分析を行った。

結果を図4に示す。決定係数が0.846であることから、一定の関係性があると言える。なお、F検定に基づくp値は0.001以下であった。予測値より極端に多い自治体としては、武蔵野市や三鷹市など、全体に対する路線バスの車両が占める割合が高い自治体であることが確認できた。路線バスの車両密度には改善の余地は残るものの、回帰式の結果より、昼間人口密度が1000人/km²増加すると15.5便/km²増

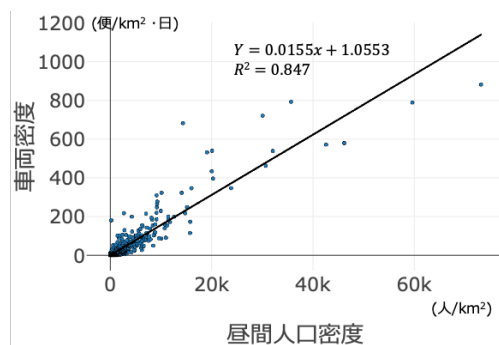


図4 車両密度と昼間人口密度の関係

加するという、おおよその関係性が示された。

#### 4. 市区町村内移動需要の推定

次に、市区町村内の移動と公共交通網の対応関係を確認する。そのために、居住地人口と、商業施設分布より各市区町村内日常移動需要を推定する。その出発地・目的地間の所要時間を計測し、移動需要に対する、公共交通の速達性・利便性を評価する。

##### 4.1. 使用データ

居住地は 2015 年国勢調査 2 分の 1 地域メッシュ統計 (500m メッシュ) の重心点座標を用い、メッシュの総人口を居住地の人口として用いる。この居住地メッシュから、商業集積地への移動を日常移動として用いる。商業集積地の抽出は 2020 年 1 月のテレポイント Pack! を用いている。その中で秋山ら (2013) と同様に、各種小売店、サービス業を含む 223 種類の業種を対象とした。この商業施設の分布から、カーネル密度推計 (バンド幅 500m, ArcGIS による計算) を行い、カーネル密度から周辺、および各市区町村の平均値より高い密度の値を取るローカルピーク点を商業集積地とする。

##### 4.2. 商業集積地への移動

住民の購買における選択行動は、指数型ハフモデル (栗田, 2002) を用いて推定する。居住地  $i$  の住民が、商業集積地  $j$  を選択する確率  $p_{ij}$ 、移動需要量  $f_{ij}$  を求める。

$$p_{ij} = \frac{s_j \exp(-\gamma d_{ij})}{\sum_{j \in J} s_j \exp(-\gamma d_{ij})} \quad (1)$$

$$s_j = \frac{K_j - \text{Min}(K_j)}{\text{Max}(K_j) - \text{Min}(K_j)} \quad (2)$$

$$f_{ij} = P_i p_{ij} \lambda(d_{ij}) z_{ij} \quad (3)$$

ただし、

- $p_{ij}$  : 出発地  $i$ -集積地  $j$  間の選択確率
- $s_j$  : 目的地  $j$  の魅力度
- $f_{ij}$  : 出発地  $i$ -集積地  $j$  間の移動需要量
- $d_{ij}$  :  $i$ - $j$  間の直線距離
- $K_j$  : 集積地  $j$  のカーネル密度値
- $z_{ij}$  :  $i, j$  が同自治体にあるかを示す (0-1) 変数
- $\gamma$  : 距離逓減パラメータ

である。ここで、パラメータ  $\gamma$  は選択確率に対する移動による負の影響度合いを示している。このパラメ

ータは (1) 式の距離低減を示す部分  $\gamma d_{ij}$  を無限遠まで積分した式に、平均 4km 移動するとして得られる  $\gamma = 0.5$  を用いる。なお、平均移動距離の 4km については、巖・長谷川 (2020) において調査された日常移動に関するアンケートで、商業施設への平均移動時間が 12.7 分であったことから、平均速度 20km/h で 4km 程度移動すると仮定して得られた値である。

また、 $s_j$  は集積地の魅力度を示している。式 (2) に示した、商業集積地  $j$  におけるカーネル密度の推定値  $K_j$  を、周囲 30km の集積地における最大最小値で標準化した値を用いる。

そして、得られた選択確率  $p_{ij}$  に居住地  $i$  の総人口を乗じることで  $i$ - $j$  間の総移動需要を得られるが、至近距離の移動であれば徒歩や自転車で移動することを考慮し、距離帯別の交通手段選択確率  $\lambda(d_{ij})$  も乗じる。これは図 5 に示す平成 27 年度全国都市交通特性調査における、移動距離別・平日・私事・手段分担率 (ネット) を用いる。また、自治体内移動に限定した評価を行うため、同市内にある集積地のみかどうかを示す変数  $z_{ij}$  も乗じた。

##### 4.3. 移動時間の計測方法

居住地  $i$  の住民はメッシュの重心点から 8:00 から 11:30 までの 30 分毎に出発し、上下斜めの隣接メッシュを加えた 9 メッシュに含まれる任意の停留所から、同じく商業集積地  $j$  を含む、あるいは隣接する 9 メッシュに含まれる任意の停留所まで移動し、そこから目的地まで移動する。このとき、出発地から停留所までのアクセス時間、公共交通の移動時間、停留所から目的地までのイグレス時間を合計した総移動時間が最小となる停留所のペアを選択する。ただし、 $i, j$  の周辺に停留所が存在しない場合、もしくは  $i$  から  $j$  に 60 分の移動時間で到達出来ない場合

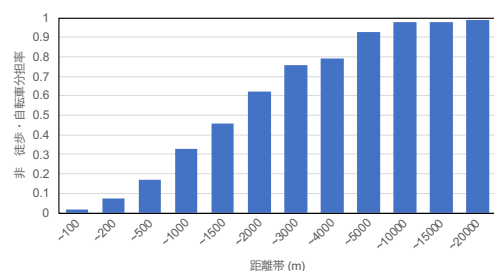


図 5 距離帯別交通手段利用分担率



は移動不可能な需要とした。なお、アクセス・イグレス時間は乗換時間と同様に点間の直線距離を4.8km/hで移動した時間を用いる。

## 5. 公共交通網の評価方法

推定した市区町村内の移動需要に対する公共交通網の対応について、需要捕捉率、速達性、利便性の3つの観点から評価し、3章で述べた車両密度の基礎分析の結果も踏まえ、その結果を考察する。

### 5.1. 需要捕捉率

推定した移動需要のうち、いずれかの時間帯で公共交通を使って60分以内で移動できる需要の割合を移動需要カバー率とする。

$$F = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij}} \quad (4)$$

ただし、

$f_{ij}$  : 出発地*i*-目的地*j*間の移動需要量 (人)

$x_{ij}$  : *i-j*間が移動可能かを示す(0-1)変数である。需要捕捉率は必要な地域間が公共交通網で結ばれているか、路線のカバー率を示した値である。

### 5.2. 速達性指標

居住地*i*から目的地*j*までの直線距離と、*i-j*間の最短移動時間、移動人数より求める平均移動速度( $V$ )によって速達性を評価する。

$$V = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij} v_{ij}^*}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij}} \quad (5)$$

$$v_{ij}^* = d_{ij} t_{ij}^*{}^{-1} \quad (6)$$

ただし、

$v_{ij}^*$  : *i*から*j*への最短移動速度 (km/h)

$t_{ij}^*$  : *i*から*j*への最短移動時間 (h)

$d_{ij}$  : *i*から*j*への直線距離 (km)

である。 $v_{ij}^*$ によって*i-j*間の速達性*V*の値が高いほど速達性の高い交通網であると言える。需要捕捉率が高い地域であっても、迂回や待ち時間、乗り継ぎが多く、移動に時間のかかる地域は速達性の低い交通網とみなすことができる。

### 5.3. 利便性指標

出発する時間によらず、いつ出発しても同様の移動ができることが、利便性の高い交通網と言える。よって、*i-j*間の出発時間別移動時間の標準偏差に対し、*i-j*間の需要量による加重平均をとった移動時間偏差*S*を利便性指標とする。

$$S = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij} s_{ij}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij}} \quad (7)$$

ただし、

$s_{ij}$  : *i*から*j*への移動時間の標準偏差 (分)

である。 $S$ の値が0に近いほど、出発時間による時間のぶれが少なく、利便性が高いことを示す。

図6に埼玉県戸田市における人口、路線網、商業集積地の位置・規模と、それらを用いて求めた $f_{ij}$ 、 $v_{ij}^*$ 、 $s_{ij}$ を示す。当市はJR埼京線が南北に縦貫し、各駅から東西方向にバス路線が伸びる路線網が構築されている。人口、商業集積地共に市の東側に集中しており、その地域の移動需要は多い。また、縦貫する鉄道の貢献で、南東の人口集中地域からの移動速度は速い一方で、人口の少ない西部は利便性が低く、速度が5km/h以下となる移動が多い。特に西部から北部にかけての移動は直達するバス路線が無く、移動速度が遅く、かつ移動時間のぶれが大きい、利便性の低い動線となっていることがわかる。このように、本手法を用いることで、地点間移動需要の速達性・利便性を評価し、公共交通不便地域を把握す

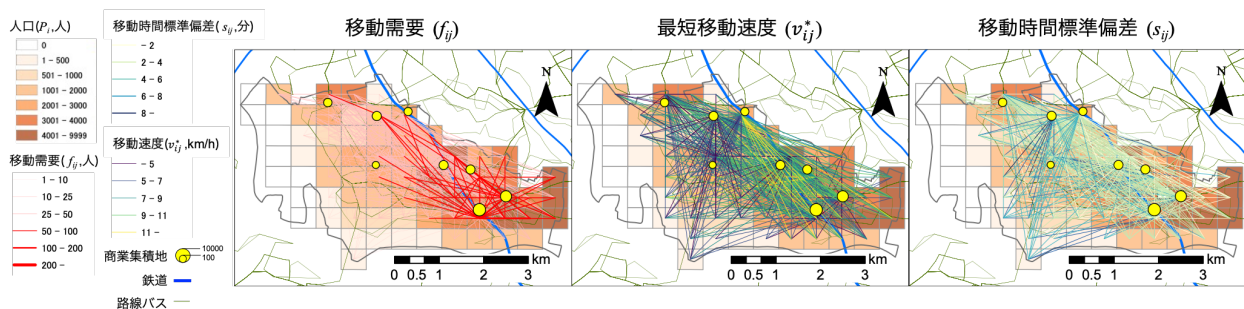


図6 人口・路線網・商業集積地の位置と移動需要量・地点間速度・移動時間偏差

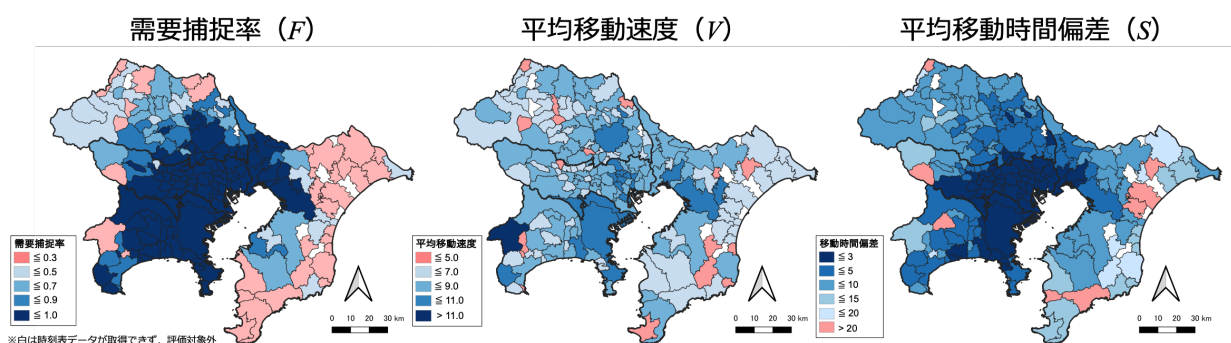


図7 市区町村別の需要捕捉率, 平均移動速度, 平均移動時間偏差

ることが可能となる。

#### 5.4. 市区町村別評価結果

1都3県の市区町村における  $F$ ,  $V$ ,  $S$  の値を図7に示し, それぞれの指標に基づいた評価を行う. 需要捕捉率から見ると, 東京23区を中心として, 捕捉率0.9以上の自治体が広がっているが, 郊外になるにつれその値が減少していくことがわかる. ただし, 東・北方面に比べ, 都心へ向かう鉄道路線の密度が高い西, 南西方面は関東平野の端部までという広い範囲で高い需要捕捉率を保っている.

平均移動速度については, 需要捕捉率が低い地域では停留所が遠く移動速度の低下も同様に発生するが, 一方で捕捉率0.9以上の地域においても, 平均速度7km/h以下の地域が存在する. これらの地域は都市内移動がバス中心で, かつ路線形状がカバリングを重視され, 移動需要に対応していない路線形状になっていること影響していると考えられる.

平均移動時間偏差を見ると, 都心部に近い地域では, 移動時間の偏差が平均3分以内という利便性の高い交通網が形成されており, 都心部から離れるにつれてその値が大きくなる様子が確認できる. 前章において, 昼間人口密度と車両密度の高い相関を示しているが, 車両密度の高さは移動時間の偏差の縮小に貢献している. 図8は3章で分析対象とした1058自治体における車両密度と, 平均移動時間偏差の値の関係である. 概括的であるが, 車両密度が10倍になると偏差が5分減少する関係性が確認できる. この結果から, 昼間人口などの静的な空間データより, 都市の規模に対する適正な利便性を示すことのできるモデルが構築できる可能性が示された.

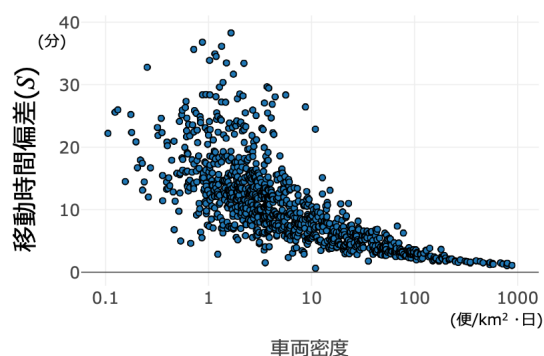


図8 車両密度と平均移動時間偏差の関係

#### 6. まとめと今後の課題

本研究では, 鉄道・バスの運行ダイヤを基にした時空間ネットワークを用い, 市区町村内における便数と地域性の関係性の分析と, 商業集積地への日常移動需要に対する需要捕捉率, 平均移動速度, 平均移動時間偏差の3指標から速達性・利便性より公共交通の性能評価を行った. その結果, 東京都心に近づくに連れて利便性が向上している点, 都心に近い地域であっても速達性に差が生じている点, 人口密度と所要時間偏差, 運行頻度の関係について示した. 今後は公共交通の性能について簡便に表現できるモデルの構築や, 都市の地方部・高齢者に合わせた移動需要推定や徒歩移動速度のパラメータ調整などを検討している.

#### 謝辞

本研究は, JSPS 科研費 21K14314, 19K15185, 大林財団研究助成を受けた. また, 本研究の一部は東京大学 CSIS 共同研究 No. 963 の成果の一部である.

## 参考文献

- 国土交通省 (2019) 『令和元 (2019) 年版 交通政策白書』.
- 河内健・赤星健太郎・内田智昭・坂井猛・吉武哲信・大森洋子・辰巳浩・谷口守・出口敦 (2016), 集約型の都市づくりの実現に向けた公共交通軸の設定方法に関する研究, 都市計画論文集, 51(3), pp.1109-1116.
- 長谷川大輔・鈴木勉 (2019), 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(1), pp.1-11.
- Yang, L., Di, Z., Dessouky, M. M., Gao, Z., & Shi, J. (2020). Collaborative optimization of last-train timetables with accessibility: A space-time network design based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 572–597.
- 赤星健太郎・高松瑞代・田口東・石井儀光・小坂知義 (2012), 低頻度な公共交通網を有する地域の移動利便性の評価手法に関する研究, 都市計画論文集, 51(3), pp.1109-1116.
- 栗田治 (2002), 輸送機関の発達が地域の商業売上に与える影響-ハブ・モデルに基づく解析学的アプローチ-, 都市計画論文集, 37, pp.55-60.
- 秋山祐樹・仙石裕明・柴崎亮介 (2013), 全国の商業集積統計とその利用環境, GIS-理論と応用, 21(2), pp.97-106.
- 嚴先鏞・長谷川大輔 (2020), 日常生活における施設利用時の複数施設利用を考慮した拠点配置と自治体の利便性評価, 都市計画論文集, 55(3), pp.1078-1085.
- 国土交通省 (2020), 平成 27 年全国都市交通特性調査.