

縮小時代の公共交通ネットワーク分析

—時空間ネットワークを用いたダイヤの評価—

長谷川 大輔

昨今のコロナ禍による人流抑制によって公共交通の移動需要は大きく減少し、それに伴う交通事業者の経営悪化によって、大幅な減便が全国的に発生している。こうした減便による、人々の移動の利便性低下を把握するためには、路線の接続時間の増加を反映した、ネットワーク分析による利便性のモニタリングが重要となる。本稿では待ち時間を正確に評価できる時空間ネットワークに着目し、他のネットワーク表現と比較した特徴とその構築方法、これまでの研究を紹介する。そして、国内主要3都市における減便の状況と、減便後の利便性悪化への影響を空間的特徴から考察する。

キーワード：COVID-19, 公共交通機関, 時空間ネットワーク, 利便性

1. はじめに

公共交通サービスは住民だけでなく観光客・来訪者などの移動手段として、地域、ひいては国内の経済を支える基盤となる重要な存在である。しかし、昨今の少子高齢化に伴う人口密度の希薄化によって、公共交通の利用者そのものの減少、およびドライバー不足による供給力の限界など、わが国の公共交通機関にはさまざまな交通課題が存在しており、特に地方部では存続の危機に瀕している地域も少なくない。

その状況に追い打ちをかけているのが、昨今の新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の感染拡大である。感染防止のために行動制限や行動変容が求められ、人々の移動パターンは大きく変化した。これによる旅客需要への影響は非常に大きく、サービス業の活動動向を示す経済産業省の第3次産業活動指数 [1] において、2015年の実績と比較して、初の緊急事態宣言が出された2020年3月を境に、鉄道旅客輸送・バス事業は6割程度、タクシー、水運、国内航空旅客輸送が3割以下と劇的に減少している。その後、2022年2月時点で鉄道・バス・タクシーは約8割、水運は6割、国内航空は4割程度の数値となっている。こうした交通事業者の経営悪化によって、全国の公共交通サービスでは大幅な減便が行われ始めており、今後、公共交通のさらなるサービスレベル縮小が予想されている。

一般的に、公共交通サービスレベルの低下・縮小が行われる際は、まず、運行車両の減便が行われ、時間

的空白が生じる。その次に、路線や配送エリアの縮小・廃止が実施され、空間的空白が生じることになる。こうした公共交通の空間的 (地理的) な空白地帯においては、コミュニティバスやデマンドタクシーといった、自治体主体で運行される地域公共交通サービスが導入されることが多く、筆者はこれまで、都市の密度に適應した地域公共交通システム構築に関して、バスの路線形状やデマンドタクシーの運行エリア設計といった空間的な適正化に関する研究を行ってきた [2]。

ただし、昨今の減便による時間的空白の評価・適正化を検討する際には、これまでとは異なる時空間分析手法が必要である。そこで本稿では、経路探索や到達圏分析といったネットワーク分析を行うための、公共交通のネットワーク構造を整理し、そのうえで運行頻度、車両の接続による待ち時間を評価できる時空間ネットワークについて着目し、構築方法と時空間ネットワークを用いた、公共交通に関するこれまでの研究を紹介する。そして、コロナ禍に入り1年が経過した2021年3月時点の公共交通の減便の状況と、公共交通の利便性への影響を時空間ネットワークによって分析した結果を示す。

2. 公共交通のネットワーク分析

2.1 公共交通のネットワーク分析と表現

公共交通を対象としたネットワーク分析は、ネットワークのトポロジーに着目し、ネットワーク科学の手法を公共交通ネットワークに応用し、ノード同士の接続関係からネットワークの構造を評価する研究と、経路探索や到達圏解析、交通流解析など、ネットワークの性能を評価する研究に大別される。前者は主に情報科学の分野で進められ、道路網やソーシャルネットワー

はせがわ だいすけ
 東京大学不動産イノベーション研究センター
 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1
 hasega60@e.u-tokyo.ac.jp

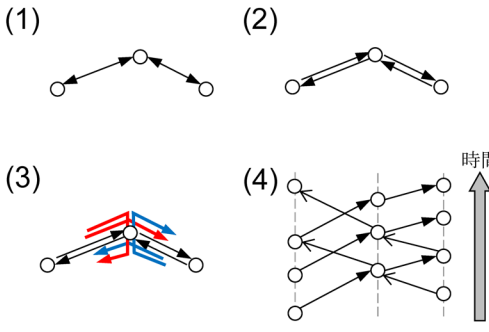


図1 交通ネットワーク構造の例

くなど、他種のネットワークとの構造の違いについて着目されている研究事例が多く（たとえば Louf et al., [3] など）、後者は都市計画、交通計画、オペレーションズ・リサーチなど、さまざまな分野で古くより用いられており、本稿ではこちらに着目する。公共交通網を表現したネットワークについては、ノード・リンクのグラフ構造の表現で図1のように分類される。(1)のリンクに距離や移動時間といった重みを与えた無向グラフが、最も単純な表現として用いられる。単純な構造ゆえにネットワークの作成の手間も小さく、国土数値情報 [4] などオープンデータとして配布されている、鉄道やバスのライン・ポイントデータから、ArcGIS などの GIS の機能 [5] を用いることで重みを有するネットワークを構築し、任意のノード間の経路探索や到達圏分析を行うことができる。また、グラフ構造のデータがあれば NetworkX [6] に代表されるネットワーク分析のライブラリを用いて多様な分析が可能となる。ここで、経路探索や一方通行、あるいは方向別に移動コストが異なる場合の考慮には、(2)のように有向グラフとしてネットワークを構築する必要がある。ただし、対象が公共交通の場合、一方通行および方向別に移動時間が異なるケースは稀であり、構築の手間、計算時間、ネットワーク分析時のハンドリングの良さから、(1)で構築される場合が多い。

次に、公共交通で重要となる待ち時間を考慮する際には、(3)、もしくは(4)の形を用いる必要がある。(3)は(2)でリンクとして扱った駅間の区間リンクをノードとし、図中の太い矢印で示すリンク to リンクの遷移情報をリンクとして扱う。こちらは道路ネットワークにおいて、右左折の時間差をリンクコストに反映するために用いられる構造であり、タクシーやライドシェア配車アプリケーションにおける経路探索・到着時間予想など、市街地での詳細な経路探索が必要となるケースにおいて用いられるネットワーク構造である [7]。公

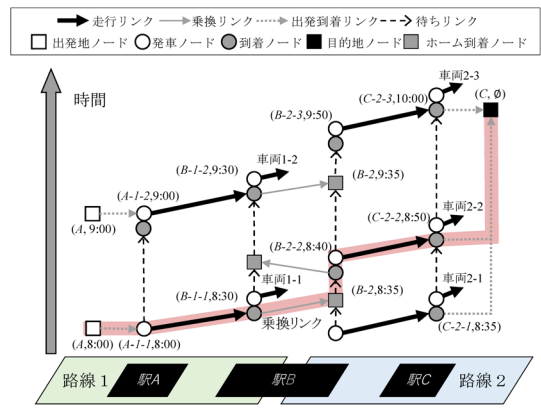


図2 時空間ネットワークの例

共交通の場合においても、駅間での停車、乗換移動をリンクとして扱うことで、駅停車時間、待ち時間、乗換時間を考慮した経路探索が可能となる。構築には前述の駅間所要時間に加えて、駅での乗車時の待ち時間、停車時間、駅における乗換時間を取得する必要があり、各交通事業者で公開されている情報や、全国的に整備が進む GTFS (General Transit Feed Specification) [8] を用いることで作成することができる。ただし、2022 年現在では国内においては未整備の地域も多く、全国規模の時刻表データについては、有償の時刻表データ [9]、乗換案内サービスの SDK [10] などから作成する必要がある。しかし、この構造では待ち時間においては平均的な時間しか反映することができず、複数の路線を乗り継ぐ移動、運行頻度の低い路線においては待ち時間を正確に評価することができない。これは、移動コストを時間帯ごとに変更する、いわゆる動的なネットワークを用いることで解決できるが、正確に表現するためには分単位の解像度でコストを定義する必要がある。利用者均衡配分やネットワークの再配置などの数理最適化手法への応用は困難となる。そのため、(4)で示すように、ネットワークを時間方向に拡張し、静的なネットワークとして駅間を結ぶ列車を一本のリンクとして表現する時空間ネットワーク（以下、時空間 NW）が必要となる。この時空間 NW という名称は、公共交通のように時刻表によって個々の車両の発着が離散的に定義される移動に対して用いられる。これに対し、徒歩や自動車移動のように、個々の出発時間が決まっていなかった連続的な移動に対して、一定の出発間隔を定めて構築したものは時間拡張ネットワークと呼称される [11]。

2.2 時空間ネットワークについて

時空間 NW は空間軸（列車・乗換・出発・到着移動別

の空間的位置), および時間軸によって構成されるネットワークである。図 2 に示す駅 A を 8:00, 9:00 に出発し, 駅 C に向かう場合を例に, 時空間 NW を構成するノード, リンクについて説明する。

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, 時間情報をもつ。ノード間のリンクは車両の走行リンク, 待ちリンク, 乗換移動リンク, そして経路探索時の起点・終点を設定するための出発到着リンクで構成される。すべて後の時間への有向リンクであり, このうち, 図 2 において実線で示されるリンクは移動時間を, 点線で示されるリンクは物理的な移動を行わない待ち時間を示している。

図中に駅 A を 8:00 に出発し, 駅 C に向かう場合の経路を表示しているが, まず出発地ノード (A, 8:00) から, A の路線 1 を通る車両 1-1 に発車ノード (A-1-1, 8:00) に乗車する。途中, 駅 B にて下車 (B-1-1, 8:30) し, 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。そして, 次の車両 2-2 に 5 分の待ち時間の後に乗車し (B-2-2, 8:40), 駅 C に 8:50 に到着 (C-2-2, 8:50) する。A を 9:00 に出発する場合は B の乗換時 15 分の待ち時間があるため, C に 10:00 到着となる。

3. 時空間ネットワークを用いた研究

本節では, これまで時空間 NW によって行われてきた公共交通分野に関する研究について紹介する。

3.1 運行頻度・路線接続を考慮した公共交通の利便性評価

赤星ら [12] では, 岩手県における鉄道・路線バスの時刻表データを用い, 各駅・バス停の発着時間および乗換時間を設定した時空間 NW を構築している。当地域は低頻度な路線が多い地域であり, 所要時間に対する待ち時間の割合が高い地域である。このネットワークを用い, 赤星らは医療機関に 2 時間滞在可能な移動ができる範囲の人口を用いた, 公共交通の利便性評価手法と, ダイヤの改善による待ち時間の解消による利便性改善効果が高い路線の選択手法を提案している。その結果, 低頻度な路線において待ち時間を解消することで, 影響が広範囲に波及し, 周辺地域の利便性改善に大きな効果をもたらすことを示している。ほか, 長谷川・巖 [13] では, 関東 1 都 3 県の市町村を対象に, 鉄道・路線バスの時刻表をもとに時空間 NW を構

表 1 時空間ネットワークの規模

	リンク数	路線数	停留所数
鉄道	2,918,226	1,246	23,522
空港	2,235	19	88
フェリー	7,107	163	522
高速・連絡バス	158,143	900	3,192
乗換リンク	6,863,877		
出発・到着リンク	7,943,719		

※路線内で特急・普通などの種別が異なれば 1 路線として集計している

築し, 市町村別の移動需要に対する需要捕捉率, 速達性を示す平均移動速度, 待ち時間の割合から見るダイヤ接続性を評価し, 公共交通網の路線網とダイヤ, どちらを改善するべきかの方向性を示している。

3.2 利用者均衡配分による路線・駅の混雑予測

時刻表に加え, 車両定員など, 輸送力に関係するデータを用いた研究例として, 田口 [14] では, 首都圏近郊の鉄道ネットワークを対象に, 大都市交通センサスによる駅間移動需要に基づいて, 東京首都圏の鉄道ネットワーク上の通勤通学客を利用者均衡配分法によって車両一本単位で推計し, 大都市交通センサスの結果と対照して高精度に推計できる手法を開発した。この田口の手法では, 駅出発・到着時間を時刻表より, 乗車定員を各社が公表している電車編成表より作成している。さらに田口 [15] では, そこに東京 2020 オリンピック大会が通常どおり開催された場合の観戦客の移動需要を加えた場合の混雑予想を行い, 大会期間中の午前 6 時から 9 時の間, 東京メトロ永田町駅や新木場駅などで構内が通常の 2 倍を超える人で溢れ, 会場に接続するゆりかもめ, 都営大江戸線などで乗車率 200% を超える区間が多く発生するなど, 深刻な混雑の発生を予想している。

以上のように, 公共交通のネットワーク分析において時空間 NW を用いることによって, ダイヤの接続や運行頻度を考慮した経路探索, 利用者均衡配分などの数理的手法を実施することができる。そのため, 昨今のコロナ禍によって発生している公共交通のサービス縮小の影響について, 時点間のダイヤ情報を用いて相対的に評価することが可能となる。次節では, コロナ禍における公共交通の利便性変化を評価した結果を述べる。

4. コロナ禍における公共交通の利便性変化

感染拡大防止の目的で実施された緊急事態宣言やまん延防止等重点措置などの人流抑制の結果, 移動需要が減少し, 公共交通の減便が全国的に進行している。

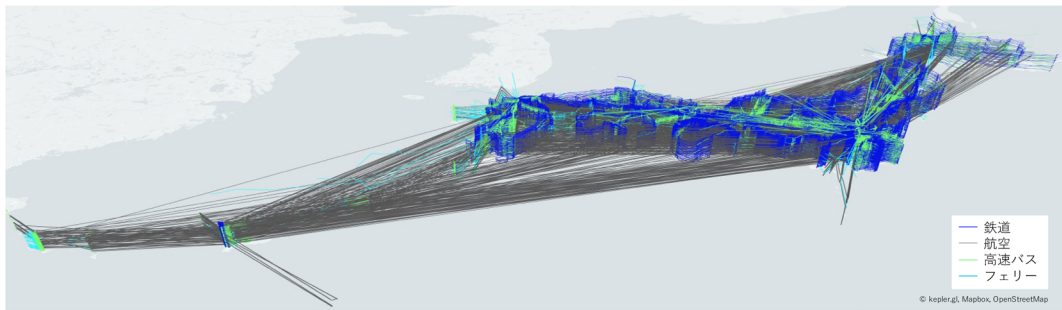


図3 公共交通（鉄道・航空・フェリー・高速バス）時空間ネットワーク

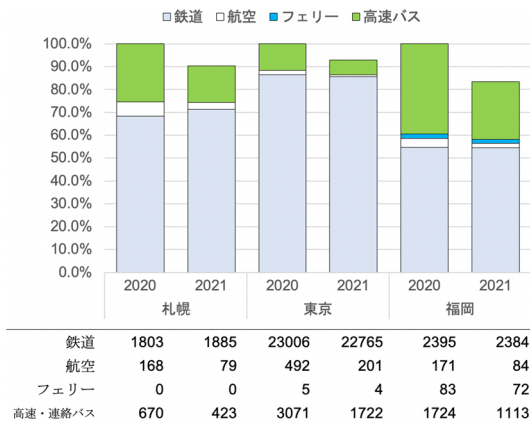


図4 都市内を出発する運行本数の年次比較（6：00～24：00、2020年の合計を100%としたときの比率）

本節では、国内主要3都市の運行便数の変化を計測し、減便の状況を交通手段別に把握する。そのうえで、都道府県間の移動需要を対象に、減便による公共交通の利便性の変化を計測し、国内移動のサービスレベルがどの程度減少したのか、その影響を計測する。

分析のために、2020年3月、2021年3月時点の、全国の鉄道・高速バスにおける出発・到着・停車時間が記載された運行ダイヤ情報を駆すばあと [9] より取得し、全国規模の時空間NWを構築した。ネットワークの規模について表1に、可視化結果を図3に示す。車両の移動が300万リンク、乗換・出発・到着リンクが1,500万リンクで構成される。これを用い、本稿では札幌・東京・福岡の三都市の変化に着目する

4.1 減便の状況

まず、2020年3月、2021年3月時点のダイヤ情報を用い、札幌（札幌市・千歳市）・東京（東京23区）・福岡（福岡市）を6:00から24:00の間に出発する車両・航空便・船便を交通手段別に集計した結果を図4に示す。図は2020年の合計を100%とし、それぞれの年で便数の比率を積み上げたもので、表は便数の実数を

time	(A)	(B)	(C)	(C')
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				
120				
130				
140				
150				
本数	8	6	4	4
平均待ち時間	9.194	12.097	23.710	21.774
標準偏差	8.042	8.686	17.272	14.677
変動係数	0.875	0.718	0.728	0.674

図5 ダイヤパターン別平均所要時間・変動係数

示している。

3都市とも2021年では本数が10%程度減少しており、特に福岡市では17.5%の減少となっている。これは、福岡市全体の便数で40%近く占めていた高速バスにおいて大きな減便が行われたためである。これはほかの都市でも同様であり、それぞれ40%弱の減便が行われている。さらに便数の変化が大きいのが航空路線であり、新千歳、羽田、福岡空港発の航空便は40~50%にまで減便されている。航空便はほかの交通手段よりも運行頻度は低く、1日数便である路線が多い。そのため、1便の減便が移動の利便性に大きな影響を与えていることが予想される。その一方で、鉄道は2021年3月時点では積極的な減便が行われてない実態が明らかとなった。

4.2 都道府県間移動における減便の影響

次に、都道府県の代表駅間の移動が、減便でどれだけ不便になっているかを計測する。2015年全国幹線旅客純流動調査 [16] より、札幌・東京・福岡を起点とし、北海道4ブロック（道南・道央・道北・道東）、お

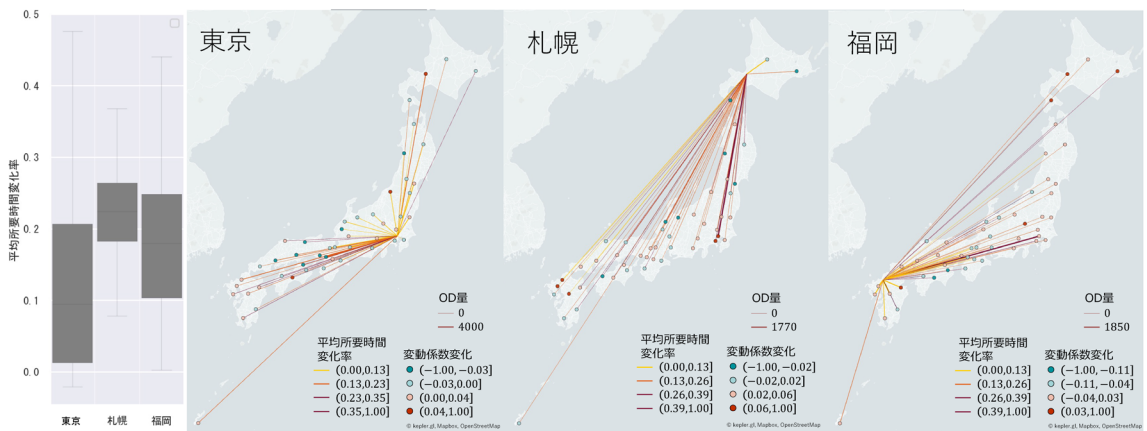


図6 都道府県間 OD を対象とした平均所要時間・変動係数変化計測結果

よび各都府県の代表駅 50 ヶ所を目的地とした公共交通利用 OD (Origin-Destination) 需要を対象とする。3 都市の代表駅である札幌駅、東京駅、博多駅を 7 時～14 時台に 15 分ごと、32 時点の発着時間別に、49 ヶ所の代表駅への最短所要時間を、2020 年 3 月・2021 年 3 月のダイヤより作成した時空間 NW を用いて計測する。利便性の評価指標として、平均所要時間、および標準偏差を平均所要時間で除した変動係数を用いる。それぞれの指標について、図 5 に示すダイヤパターンを用いて説明する。図 5 は縦軸に 5 分ごとの時間軸を取り、車両到着の時間を黒塗りで示したものであり、(A)→(B)→(C) とダイヤが 8 本から 4 本に減便されている様子を示している。それぞれの乗車までの平均待ち時間を比較すると 9 分、12 分、23 分と減便が進むほど値が大きくなる。ただし、(B) から (C) のように間引きされるのではなく、(C') のように等間隔に調整された場合、平均待ち時間、および変動係数が小さくなる。石原ら [17] では、等間隔ダイヤは待ち時間の期待値が最小となることを示していることから、減便が行われた際には平均待ち時間は増加してしまうものの、変動係数が小さくなる場合は悪化を最低限に抑えるよう、ダイヤが等間隔に調整されたと捉えられる。

札幌、東京、福岡起点の OD について、平均所要時間の分布、および OD ごとの平均所要時間と変動係数の変化を計測した結果を図 6 に示す。なお、変動係数は 2021 年と 2020 年の差を、平均所要時間は各年の差を 2020 年の値で除した変化率によって計測を行っており、線の太さで OD 量を、色で平均所要時間の変化率、目的地の点の色で変動係数の差を示している。都市ごとの平均所要時間の分布を見ると、最も交通網が発展している東京起点からの移動においては、0～

2 割程度増加した OD が多く、福岡においては 1 から 2.5 割、札幌においては 2～2.5 割程度の所要時間増加が見られる。具体的に地図で確認すると、東京においては新幹線で結ばれている東北、信越、北陸地方、名古屋方面の平均所要時間の増加が少ない一方で、北海道、四国、九州など航空便での移動が主となる地域間では、2～3 割の平均所要時間増が見られる。また、札幌の評価結果を見ると、移動需要の多かった首都圏への平均所要時間が 3 割弱増加しており、さらに変動係数も大きいことから、航空便はダイヤが調整されない単純な間引きが行われていることがわかる。一方で、道内の移動も 1, 2 割程度の増加が見られるものの、変動係数は減少傾向となっている。こちらは高速バスのダイヤの等間隔化が進んだとも見えるが、経路を確認すると、減便が進んだ高速バスの代わりに鉄道が使われる時間帯が増えていた。同様の傾向は福岡から首都圏、九州内各都市への移動にも見られるが、新幹線が接続する鹿児島、熊本、山口、広島などは、平均所要時間、変動係数ともに変化が小さい。以上の結果から、航空便・高速バスの減便が進んだ結果、国内の主要都市間で 2 割以上の平均所要時間の悪化が発生しており、特に代替手段のない航空便の間引きの影響が大きいことがわかる。

5. おわりに

本稿では、公共交通にネットワーク分析、特に時空間ネットワークについて、その構築方法と研究事例を紹介した。さらに、複数時点のネットワークを活用することによって、昨今のコロナ禍における減便の影響について示した。今回分析を行った 2021 年 3 月以降も交通事業者の経営状態が回復しておらず、今後とも

減便・縮小が進むものと予想される。そのため、コロナ禍で注目されるようになった人流の変化 [18] と同様に、公共交通の利便性を継続してモニタリングすることで、たとえば人流の増加に対して公共交通サービスは低レベルのまま、といった乖離の状況などを把握でき、EBPM（証拠に基づく政策立案）に基づく都市運営の一環として期待できる。

謝辞 本稿で構築している時空間ネットワークについては JSPS 科研費 21K14314 および大林財団研究助成を受けて研究を行ったものである。

参考文献

- [1] 経済産業省, 「第3次産業活動指数」, <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/sanzi/index.html> (2022年4月30日閲覧)
- [2] 長谷川大輔, “需要密度・分布に対応した地域公共交通システム構築に関する数理的研究,” 筑波大学大学院システム情報研究科博士論文, 2019.
- [3] R. Louf, C. Roth and M. Barthélemy, “Scaling in transportation networks,” *PLoS ONE*, **9**, e102007, 2014.
- [4] 国土数値情報, 「鉄道時系列・バスデータ」, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2022年4月30日閲覧)
- [5] ArcGIS, Network Analyst, <https://www.esri.com/products/network-analyst/> (2022年4月30日閲覧)
- [6] NetworkX developers, NetworkX, <https://networkx.org/> (2022年4月30日閲覧)
- [7] T. Saito, S. Tanimoto and F. Takahashi, “Hierarchical positional approach for ETA prediction,” In *Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pp. 650–653, 2021.
- [8] Google, GTFS Static Overview, <https://developers.google.com/transit/gtfs> (2022年4月30日閲覧)
- [9] 交通新聞社, 「時刻表・構内図データ」, https://www.kotsu.co.jp/service/jikoku_solution/data_sales/ (2022年4月30日閲覧)
- [10] ヴェアル研究所, 「駅すばあと SDK」, <https://ekiworld.net/service/sier/sdk/index.html> (2022年4月30日閲覧)
- [11] 渡部大輔, 島海重喜, 田口東, “東京オリンピック・メインスタジアムへの観戦客に対する新宿御苑を活用した動線計画,” 都市計画論文集, **52**, pp. 1341–1348, 2017.
- [12] 赤星健太郎, 高松瑞代, 田口東, 石井儀光, 小坂知義, “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, **47**, pp. 847–852, 2012.
- [13] 長谷川大輔, 巖先舗, “ダイヤの接続性を考慮した地域公共交通網の性能評価手法に関する研究,” 都市計画論文集, **56**, pp. 532–538, 2021.
- [14] 田口東, “首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, **48**, pp. 85–108, 2005.
- [15] 田口東, “東京オリンピック観戦客輸送の余裕を首都圏電車ネットワークは持っているか,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **62**, pp. 5–14, 2017.
- [16] 国土交通省, 「2015年度全国幹線旅客純流動調査」, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000018.html (2022年4月30日閲覧)
- [17] 石原洋平, 中川大, 松中亮治, 大庭哲治, “都市内公共交通のダイヤ設定条件と実際のダイヤの評価 期待所要時間の観点から,” 都市計画論文集, **45**, pp. 829–834, 2010.
- [18] 巖先舗, 長谷川大輔, 相尚寿, “滞在人口から見た商業集積地区における活性度の評価,” 地理情報システム学会講演論文集, **30**, B30-3-1, 2021.