

遅延時間を含めたバスの運行状態の時空間的な可視化

笠原有貴*・中谷友樹**・磯田弦***・柴田嶺****

Spatio-temporal visualization of bus operations with delay times

Yuki KASAHARA, Tomoki NAKAYA, Yuzuru ISODA, Ryo SHIBATA

Abstract: In recent years, thanks to the development of information and communication technology, a large amount of traffic flow data has been obtained to understand the actual state of human movement. The understanding of human movement plays an important role in a variety of situations, such as urban transportation planning, marketing, crime prevention, measures against infectious diseases. In addition, in recent years, General Transit Feed Specification (GTFS) data has become popular as a data standard that combines the network and schedule of public transportation systems, making it possible to analyze the delay time of public transportation systems. The purpose of this study is to visualize the delay time in the city bus service of Sendai City Transportation Bureau in time and space to understand the actual state of bus service on October in 2019.

Keywords: 時空間分析 (spatio-temporal analysis), GTFS (General Transit Feed Specification), 可視化 (visualization), 遅延時間 (delay time), バス (bus)

1. はじめに

近年、情報通信技術の発達により、人の移動の実態を把握できる動線データが多数取得されるようになっていく。人の移動の実態把握は、交通分野やマーケティング、防災、医療・環境など、様々な場面において活用されてきた(関本ほか, 2011)。一方で、人の移動を規定する様々な交通条件がある。例えば、バスや鉄道のような公共交通機関であれば、その運行経路・スケジュールを念頭に人々の移動が計画・実施される。そうした公共交通機関等のネットワークと運行スケジュールを合わせたデータ規格として、近年では GTFS (General Transit Feed Specification) が普及しつつある(柴田ほか, 2020)。

ただし、公共交通機関が常に運行スケジュールに従って運行される訳ではなく、現実では混雑等の状況を反映して遅延も発生し、これが人々の移動に影響

を与えている。GTFS を実際の運行実施記録と比較することで、公共交通機関の遅延についてその詳細を分析することが可能となっている(Raghothama et al., 2016; Bast et al., 2014)。

本研究では、仙台市交通局の市バスを対象とし、バスの運行実施記録データと GTFS を結合させることによって、当該市バスの遅延発生に関する情報を算出し、その時空間的な可視化を通して仙台市バスの遅延を踏まえた運行実態の把握を目的とする。

2. 研究方法

2.1 使用したデータ

本研究では、仙台市交通局による 2019 年 10 月 1 ヶ月間の市バスの運行実施記録データ(以下、運行データ)と、独自に作成した市バスの GTFS データを用いた。市バスの運行データには、各路線の運行

*: 学生会員 東北大学理学部地圏環境科学科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 Email: yuki.kasahara.s8@dc.tohoku.ac.jp

**：正会員 東北大学大学院環境科学研究科先端環境創成学専攻

***：正会員 東北大学大学院理学研究科地学専攻

****：学生会員 東北大学大学院理学研究科地学専攻

便（以下、トリップ）ごとに運行日、停車した停留所の名称・IDのほか、各停留所での発着時刻と乗降客数のデータが格納されている。GTFS データは、トリップごとの各停留所における停車予定時間のほか、各停留所の ID や位置座標なども格納されている。この停留所 ID は、市バスの停留所 ID と一致するため、停留所 ID を基に運行データと GTFS データを結合することでトリップごとの遅延時間が計算可能となる。

2.2 データの処理方法

2.2.1 GTFS データの作成

GTFS データは、平日、土曜日、日曜日・祝日別に平成 31 年 4 月 1 日に改正された時刻表データを基に、VBA スクリプトによる処理によって作成した。

2.2.2 バスの運行データと GTFS データの結合

バスの運行データでは、トリップ（便）ごとに運行実施記録がまとめられており、これに対応する GTFS のトリップ ID を運行データに付与した。具体的には、バスの運行データには停車した停留所とその次の停留所の ID が同じレコードに格納されており、あわせてトリップごとに停車順や始発停留所を出発する時刻も格納されているため、PostgreSQL を用いてこれらのトリップ情報の一致する組み合わせを GTFS データから見つける処理を実施した。さらに、停留所 ID を基に、各停留所の位置座標も運行データに付与した。これにより各日のトリップごとに、運行記録と時刻表で示されている運行スケジュールが結合されることになる。

2.2.3 遅延時間の計算

バスの運行データには、実際の発着時刻が停留所別に記録されている。正確には、停留所別に扉が最初に開いた時刻（以下、時刻 A）、扉が最後に閉められた時刻（以下、時刻 B）、別の停留所に歩進した時刻（以下、時刻 C）が記録情報となっている。また、データの欠損があった一部を除いては、基本的には停車した場合はいずれの時刻も記録されているが、通過した場合は時刻 C のみ記録されており、始発停

留所では時刻 C は記録されているが時刻 A や時刻 B は記録されているものもある。終点では時刻 A は記録されているが時刻 B や時刻 C は記録されていない場合もある。

そこで、データの欠損があるものを削除した後、停車した場合は時刻 A を到着時刻、時刻 C を出発時刻とし、通過した場合は到着時刻、出発時刻をともに時刻 C とし、始発停留所は出発時刻を時刻 C とし、終点は時刻 A を到着時刻とした。その結果、対象とする 31 日間において、トリップ ID を付与し遅延時間を計算できたトリップは全トリップの約 82.1% (2,412,914 トリップ)となった。

遅延時間としては、各停留所におけるそのトリップでの累積の遅延時間と、各停留所間の所要時間の遅延時間の 2 つを計算した。累積の遅延時間は、各停留所での実際の到着時刻と時刻表における到着時刻の差である。区間別の所要時間の遅延時間は、各停留所間において、区間の始点となる停留所での出発時刻から区間の終点となる停留所での到着時刻までに要した時間を所要時間とし、GTFS による当該トリップの計画された所要時間との差分を計算することにより求めた。なお、GTFS における時刻表データは到着時刻・出発時刻の区別がないため、両者は等しいと考えてともに時刻表データの時刻とした。

2.2.4 バス路線データの作成

本研究では遅延時間を GIS 環境において可視化する。ただし、各停留所における遅延時間を可視化するためには、バス路線データを停留所間ごとに作成し、バスの運行データと結合させる必要があった。そこで、ArcGIS において、国土数値情報からバスルートのラインデータを取得してインポートし、GTFS による各停留所の位置座標から、バスルートのラインデータを頂点とバス停留所で分割した。すなわち、バス路線データをセグメント化した。そして、各セグメントの始点となる停留所と終点となる停留所からセグメント ID をバスの運行データに結合させることで、停留所間の遅延時間も可視化可能となった。

3. 結果

3.1 遅延時間の時間的な特徴

3.1.1 累積遅延時間の曜日別・時間帯別特徴

まず、全停留所での累積の平均遅延時間に関して日別の平均値を図 1 に示した。この平均値は、日毎に全停留所での累積遅延時間を全て足し合わせ、終点も含めて停車数で除したものである。なお、土曜日は 10/5、10/12、10/19、10/26、日曜日は 10/6、10/13、10/20、10/27 であり、また、10/14 は体育の日、10/22 は即位礼正殿の儀のため祝日であった。祝日は日曜日と同じダイヤである。図 1 によると、基本的に平日の遅延時間が長く、その中でも特に金曜日が長くなる傾向が認められる。

次に、累積の遅延時間に関して日毎に時間帯による違いを調べたところ、平日、土曜日、休日はそれぞれ同じような特徴が見られた（図 2-4）。

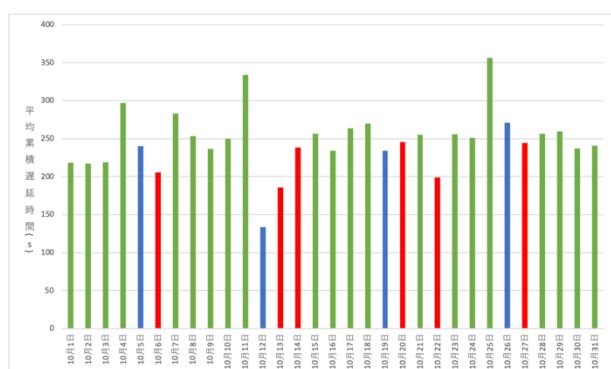


図 1 日毎の平均累積遅延時間

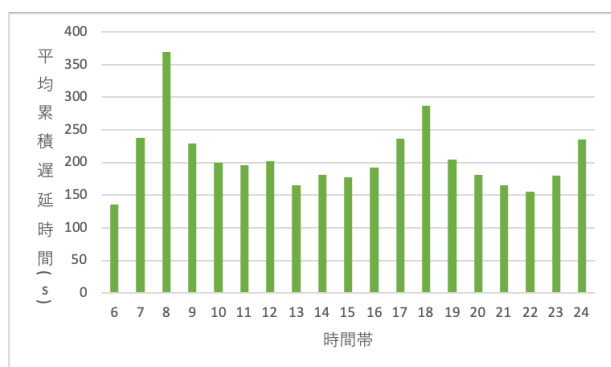


図 2 10/1(火)の時間帯毎の平均累積遅延時間

図 2 にみられるように、平日の平均遅延時間は通勤通学時間帯である 8 時台と 18 時台にピークがある。運行している路線は限られるが 24 時台も長く

なっている。図 3・4 より、土曜日・休日ではともに 17 時台頃と 22 時台以降が長くなる傾向がある。

さらに、路線の方向による検討も行ったが、いずれの曜日においても方向による傾向の違いはほとんど認められなかった。

3.1.2 天候と累積遅延時間

ただし曜日・時間帯別の傾向とは大きく異なる遅延パターンが生じることもある。10/12(土) - 13(日) は図 5・6 に示すように例外的な遅延発生傾向が認められ、10/12 では 17 時台頃にピークが見られず 22 時台の平均遅延時間が極端に長くなっている。10/13 は 6 時台の運行記録がなく、7 時台や 8 時台の平均遅延時間が極端に長くなっていた。当該の日について仙台市は台風 19 号の影響を受けており、12 日の 18 時以降から徐々に雨風が強まって、13 日の未明までその状態が続いたことが、こうした例外的な遅延パターンを発生させたものと考えられる。

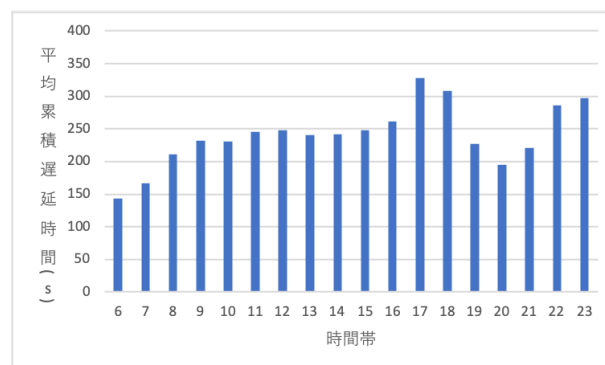


図 3 10/5(土)の時間帯毎の平均累積遅延時間

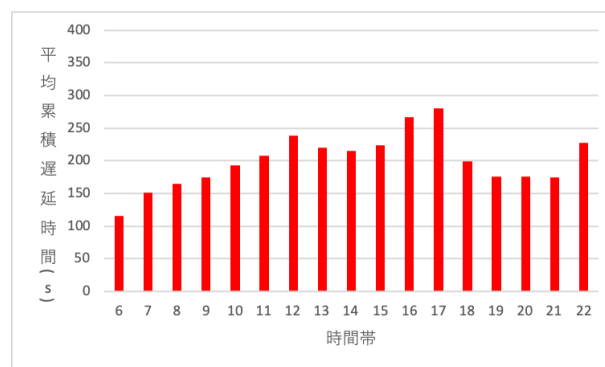


図 4 10/6(日)の時間帯毎の平均累積遅延時間

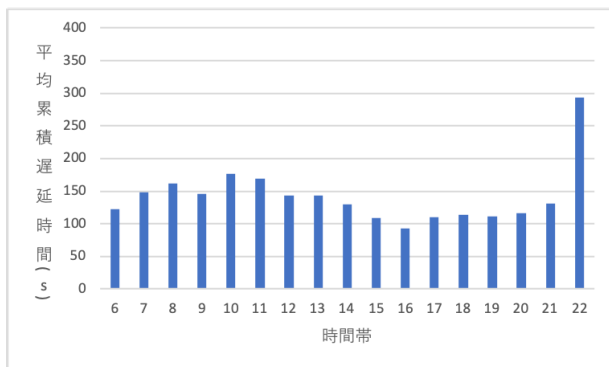


図 5 10/12(土)の時間帯毎の平均到着遅延時間

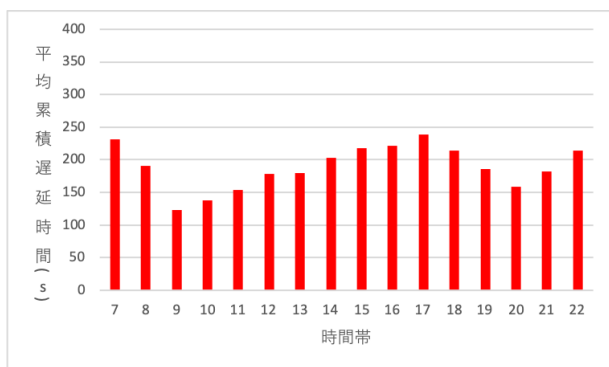


図 6 10/13(日)の時間帯毎の平均到着遅延時間

3.1.3 各停留所間の遅延時間の曜日別・時間帯別特徴

次に、各停留所間における所要時間の遅延時間に関して日による違いを調べたところ、図 7 のようになった。この平均値は、日毎に全停留所間での所要時間の遅延時間を足し合わせ、セグメント数で除したものである。

図 7 によると、平均累積遅延時間が長かった金曜日は、10/18 を除いて、10/4、10/11、10/25 において正の値となっていたが、ほとんどの日において負の値となり、平日は土曜日や休日よりも値が小さくなっていた。負の値となる日が多いことから、バスの運行スケジュールは停車時間なども考慮して設定されていることが窺える。しかし、図 1 より平均累積遅延時間は平日が長くなっていた。この 2 つの遅延時間指標の間にみられる齟齬の原因として考えられるのは、平日は土曜日や休日よりも乗降のために停車する回数が多く、それにより累積の遅延時間が長くなっているということである。実際に乗降のある停留所の割合を日毎に計算すると、図 8 のように平日は全て 6 割強であるのに対し、土曜日や休日は

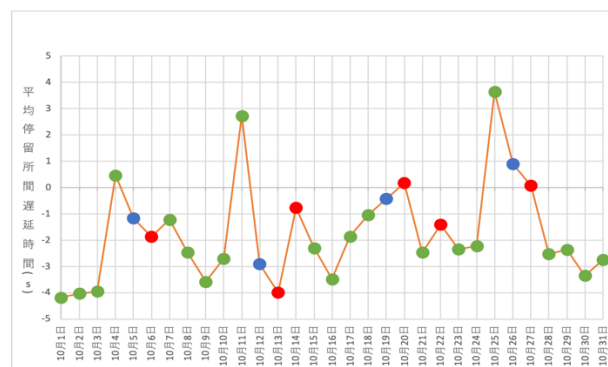


図 7 日毎の平均停留所間遅延時間



図 8 日毎の乗降のある停留所の割合

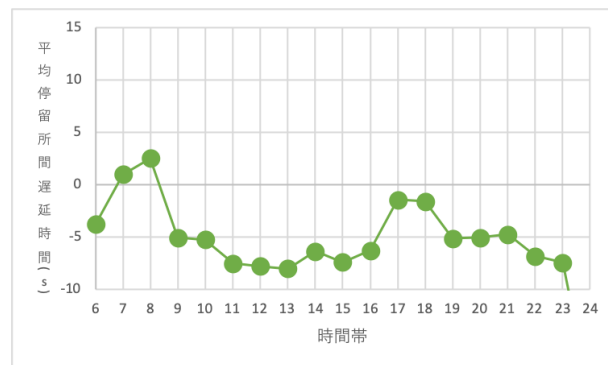


図 9 10/1(火)の時間帯毎の平均停留所間遅延時間

6 割未満で、特に台風 19 号の影響のあった 10/12 や 10/13 は 4 割程度となっていた。

さらに、各停留所間における所要時間の遅延時間に関して日毎に時間帯による違いを調べたところ、平日、土曜日、休日はそれぞれ同じような特徴が見られた(図 9-11)。図 9 にみられるように、平日の平均遅延時間は通勤通学時間帯である 8 時台と 17-18 時台にピークがある。図 10 より、土曜日では 17 時台に長くなる傾向がある。図 11 より、休日では一日を通して多少の変化はあるものの特に大きな変化

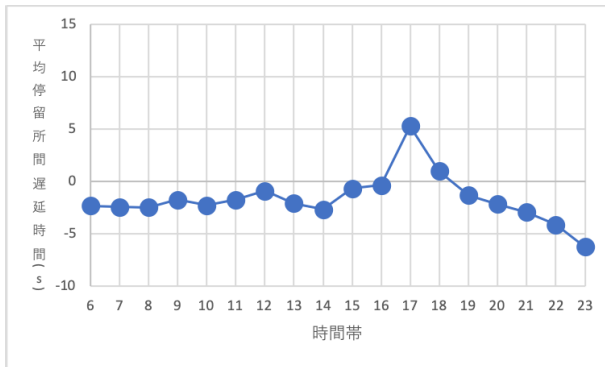


図 10 10/5(土)の時間帯毎の平均停留所間遅延時間

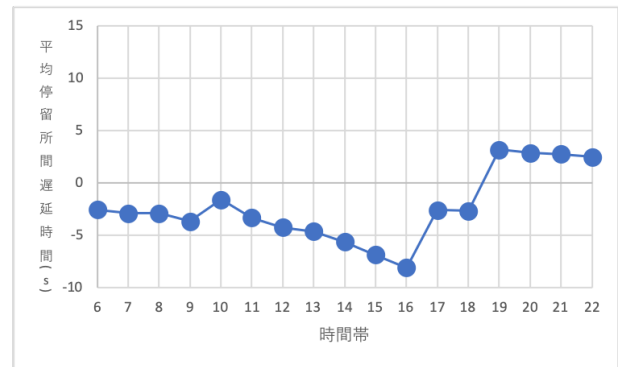


図 12 10/12(土)の時間帯毎の平均停留所間遅延時間

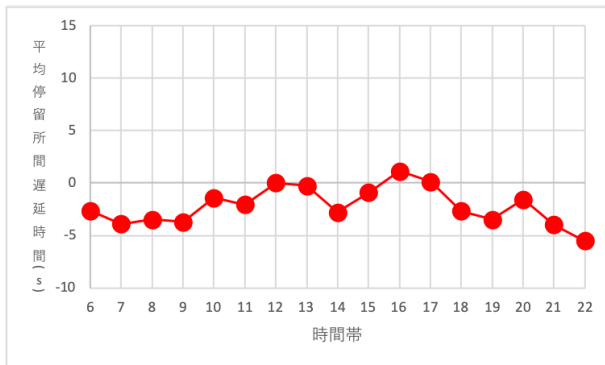


図 11 10/6(日)の時間帯毎の平均停留所間遅延時間

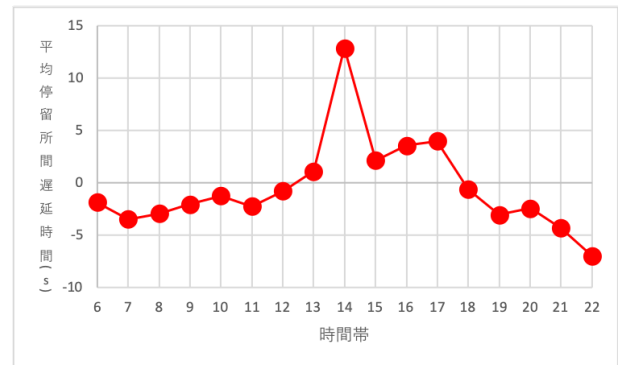


図 13 10/27(日)の時間帯毎の平均停留所間遅延時間

はなかった。

さらに、路線の方向による検討も行ったが、いずれの曜日においても方向による傾向の違いはほとんど認められなかった。

3.1.4 天候・イベントと各停留所間の遅延時間

ただし、累積遅延時間と同様に、曜日・時間帯別の傾向とは大きく異なる遅延パターンが生じることもある。10/12(土)は図 12 に示すように例外的な遅延発生傾向が認められ、10/12 では 17 時台にピークが見られず 19 時台以降の平均遅延時間が長くなっている。これに関しても、台風 19 号の影響によりこうした例外的な遅延パターンが発生したものと考えられる。

また、10/27(日)も図 13 に示すように例外的な遅延発生傾向が認められ、14 時台が極端に長くなっていた。当該の日について仙台市内では全日本大学女子駅伝対校選手権大会が開催され、一部の地域で交通規制を行っていたことが、こうした例外的な遅延パターンを発生させたものと考えられる。

以上より、時間的な特徴をまとめると、表 1・2 のようになった。

表 1 累積遅延時間の時間的特徴(ピーク時間帯)

平日	土曜日	休日	10/12(土)	10/13(日)
8 時台,18 時台(24 時台)	17 時台,22-23 時台	17 時台,22 時台	17 時台なし,22 時台	7-8 時台,17 時台,22 時台

表 2 停留所間遅延時間の時間的特徴(ピーク時間帯)

平日	土曜日	休日	10/12(土)	10/27(日)
8 時台,17-18 時台	17 時台	特になし	17 時台なし,19-22 時台	14 時台

3.2 遅延時間の空間的な特徴

続いて、GIS 環境において遅延時間の可視化を行った。可視化においては、路線の方向(上り・下り)も考慮して分析を行った。路線の方向は、平成 31 年 4 月 1 日に改正された時刻表データにおいて路線毎に与えられていた ID が、循環路線も含めて、上りは下 1 桁が 1、下りは下 1 桁が 2 となっていたため、この判断に基づいて定義することにした。今回は、表 1・2 を基に、時間的な特徴の見られた平日の 8 時台の上り、平日の 18 時台の下り、土曜日の 17 時台の上り、土曜日の 17 時台の下りにおいて可視化を

行った。

まず、10/1(火)の上りの8時台、10/1(火)の下りの18時台において可視化を行うと、それぞれ図14、図15のようになった。

各図において各停留所での累積遅延時間を円シンボルのカラーで示し、停留所間の所要時間の遅延時間をラインセグメントのカラーで示した。いずれも等量分類で、赤は遅延時間が長く、青は短いことを表している。また、背景として乗降者の潜在的な多さを反映すると考える人口密度の分布も示した。これも等量分類で、色が濃いほど人口密度が高く、薄いほど低いことを表している（以下同様）。

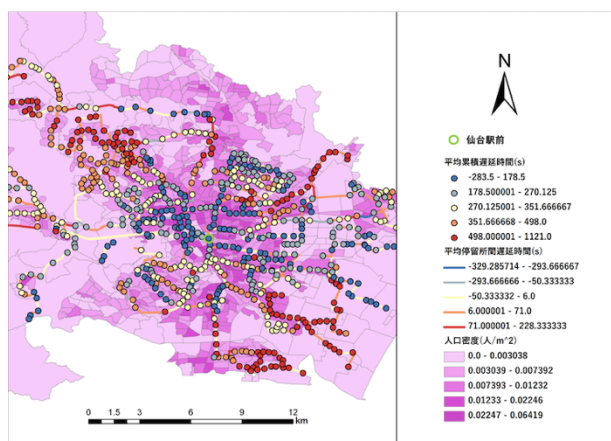
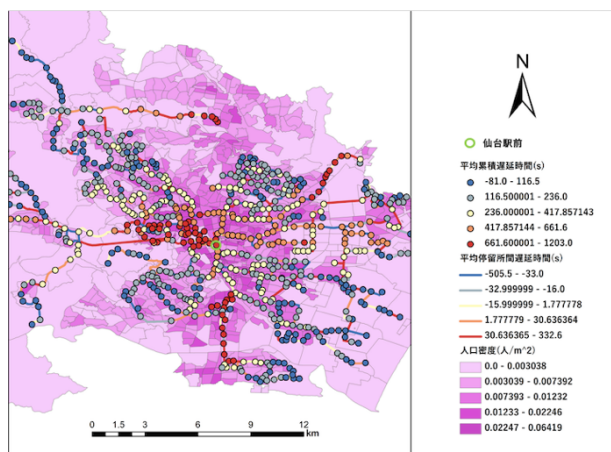


図15 10/1(火)の18時台の下りの遅延時間の分布

図14によると、累積遅延時間は人口密度の高い中心部で長くなり、上り路線の多くは中心部に位置する仙台駅前や交通局東北大学病院前を終点とするため、そのような地域で累積遅延時間が長くなって

いることが把握できた。また、中心部から少し離れた地域でも、北部の泉中央駅近辺や南部の長町駅近辺など、人口密度が比較的高くその地域の拠点となる地点は上り路線の終点付近でもあるため累積遅延時間が長くなっていた。一方で、図15によると、図14で累積遅延時間の長かった地域では短くなり、中心部から離れた人口密度が中程度の地域で長くなっていた。そのような累積遅延時間の長い地域は、下り路線の終点となる市バスの営業所がある地域であり、中心部からそのような地域へ向かうにつれて累積遅延時間が長くなっている様子を把握することができた。また北部には8時台の上りでは見られなかった路線を18時台の下りににおいて捉えることもできた。

停留所間の遅延時間に関しては、特に上り路線においては、距離の長い区間で比較的最長になっていることが見て取れた。上り、下りのいずれにおいても、大きな遅延が発生する区間は累積遅延時間が長い停留所、すなわち終点付近に集中する傾向があることも把握できた。

次に、10/5(土)の上りの17時台、10/5(土)の下りの17時台において可視化を行うと、それぞれ図16、図17のようになった。図16によると、図14と同様に人口密度の高い中心部や地域の拠点となる地点で累積遅延時間が長くなっていたが、図14よりも中心部により多くの累積遅延時間の長い停留所が集中していた。また、図17によると、図15と同様に中心部から離れた人口密度が中程度の地域で長くなっていたが、その地域は図15とは必ずしも一致せず、北西部ではより西側に、南部ではより南側に見られ、東部では別の路線で長くなっていた。

停留所間の遅延時間に関しては、図14・15と同様に上り、下りのいずれにおいても、距離が長い区間で比較的最長になっていることや遅延時間の長い区間は累積遅延時間が長い停留所、すなわち終点付近に集中する傾向があることが見て取れたが、その分布は必ずしも図14・15と類似していない。以上より、遅延時間の空間的な分布は時間帯と路線の方向に依存したパターンを呈していることが分かった。

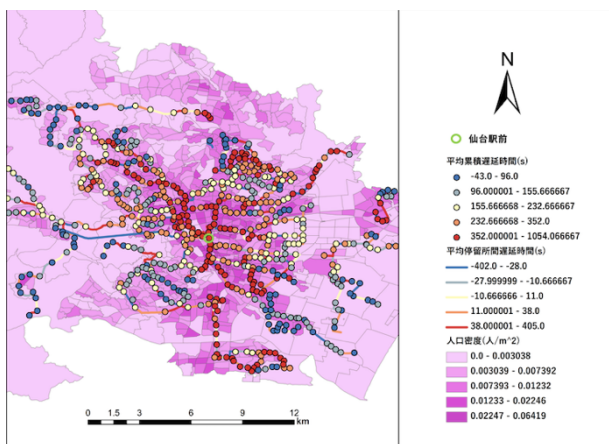


図 16 10/5(土)の17時台の上りの遅延時間の分布

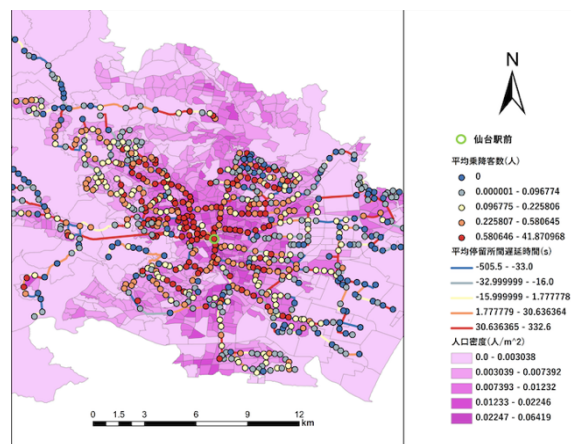


図 18 10/1(火)の8時台の上りの停留所間遅延時間および乗降客数の分布

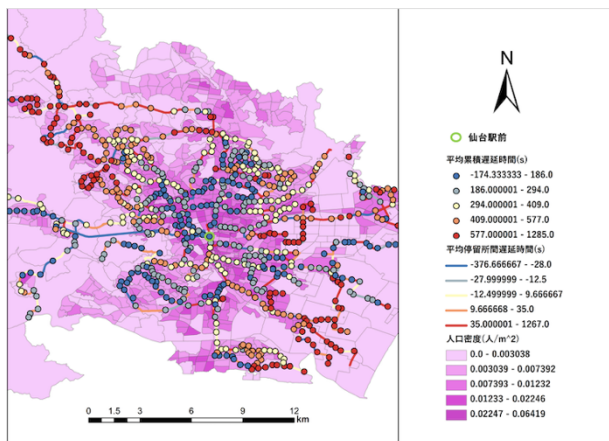


図 17 10/5(土)の17時台の下りの遅延時間の分布

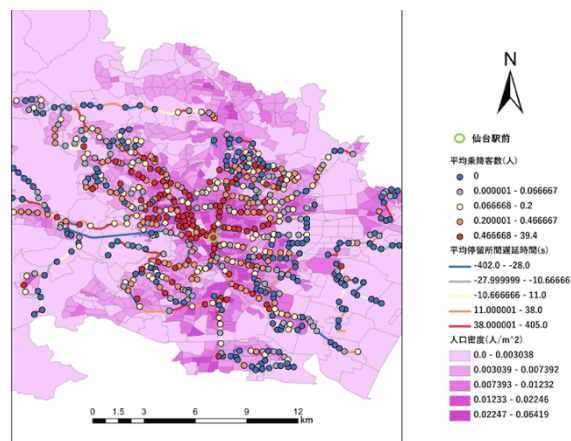


図 19 10/5(土)の17時台の上りの停留所間遅延時間および乗降客数の分布

4. 考察

本研究では、GIS 環境において遅延時間の算出と可視化を行い、バスの運行実態を把握した。その結果、遅延時間の空間的な分布は曜日や時間帯、路線の方向によって異なることがわかった。よって、今後の研究においては遅延の要因を調べるのが重要になる。先行研究においては、遅延の要因の1つに乗降客数が用いられている(佐藤, 2017; 藤原, 2016; 前川, 2013)。

そこで、遅延時間と乗降客数の関係を調べるために、10/1(火)の上りの8時台と10/5(土)の上りの17時台において、停留所間遅延時間および乗降客数に関して可視化を行った(図18・19)。平均乗降客数は、各停留所において乗車または降車した人数を全て足し合わせて便数で除したものである。図18・19ではともに等量分類で示し、赤は乗降客数が多く、

青は少ないことを表している。なお、図18・19ともに最大値が突出して大きな値となっているが、これは仙台駅前における観察される値であり、多くの上り路線の終点である仙台駅前の利用者が極めて多いことによるものである。

図18を図14と比較すると、乗降客数の多い停留所は累積遅延時間の長い停留所よりも多くが中心部に集中していることが読み取れる。停留所間における大きな遅延時間は中心部のような終点付近に集中する傾向があることから、乗降客数と停留所間遅延時間に正の相関関係が示唆される。

図19によると、乗降客数の多い停留所の分布は停留所間遅延時間が集中傾向にある中心部に多く見られるが、図16と比較すると累積遅延時間が長い

停留所の分布と類似しており、累積遅延時間との間にはより強い正の相関関係が示唆される。

このように、先行研究で遅延の要因の1つとして用いられている乗降客数は、仙台市においても遅延時間と相関関係にあることが示唆された。今後の研究では、先行研究で用いられている気象条件(佐藤, 2017; 藤原, 2016), 車内人数(藤原, 2016), 道路属性(藤原, 2016; Raghothama et al., 2016)などの他の指標や、居住者属性のような空間的な指標との関係を踏まえて、遅延の発生の機序とその条件に関してより詳細に分析することが課題である。

5. おわりに

本研究では、バスの実際の運行実施記録と GTFS データを比較することによって、バスの遅延時間を計算し、時間による特徴を調べ、さらに GIS 環境で可視化を行うことによって、空間的な特徴についても確認することができた。その結果、平日、土曜日、休日においては基本的と同様の特徴(日リズム)が見られたものの、一部の日においては天候やイベントに応じた例外的なパターンが発生することも確認された。また、分布の可視化を行うことにより、上り・下りにより遅延時間の長い地域の分布が異なり、さらに、曜日や時間帯によって同じ路線方向でもその分布が異なることが把握できた。

今後の研究では、台風 19 号の影響が示唆される 10/12, 10/13 のような例外的な日における遅延に関する空間的分布を調べることや、空間的な遅延分布の日変動の原因について、気象条件や車内人数、道路属性などの指標との系統的な関係の有無を調べることによって、さらに遅延発生の詳細を分析することが課題である。

参考文献

気象庁 各種データ・資料 過去の気象データ検索.<
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_s_1.php?prec_no=34&block_no=47590&year=2019&month=10&day=12&view=>.

佐藤孝大・大場みち子(2017) 運行実績データに基づくバス到着時刻予測モデルの開発. 情報処理学

会第 79 回全国大会講演論文集, 409-410.

柴田嶺・吉川湧太・今川諒・磯田弦・関根良平・中谷友樹(2020) GTFS を用いた仙台市地下鉄東西線開業前後の時空間アクセシビリティ変化に関する研究. 日本地理学会発表要旨集 2020s(0), 145.
関本義秀・薄井智貴・金杉洋・増田祐介(2011) 都市空間における効率的な動線解析の共通基盤のあり方について.「土木学会論文集 F3(土木情報学)」, Vol. 67, No. 2, I_170-I_180.

仙台市交通局 運行系統図 . <
<https://www.kotsu.city.sendai.jp/bus/map020401.html>>.

第 38 回 全日本大学女子駅伝対校選手権大会 コース・交通規制 . <<http://www.morinomiyako.com/course.html>>.

藤原由美恵・花田智・白石陽(2016) 道路データとバス運行データを用いたバスの遅延要因分析. 第 78 回全国大会講演論文集, vol. 2016, no. 1, pp. 395-396.

前川裕一・林夏美・牧野友哉・白石陽(2013) バス到着時刻予測におけるバス運行所要時間データと乗降客数データの活用. マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集 2013(6), 165-171.

Bast, H., Brosi, P., Storandt, S., 2014. Real-Time Movement Visualization of Public Transit Data. *SIGSPATIAL '14: Proceedings of the 22nd ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, Pages 331-340.

Raghothana, J., Shreenath, V.M., Meijer, S., 2016. Analytics on Public Transport delays with Spatial Big Data. *BigSpatial '16: Proceedings of the 5th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Analytics for Big Geospatial Data*, Pages 28-33.