

# 路線バスと他の交通機関との相互乗り換えを保証するための 遅延状況調査および運行ダイヤ改善指標の検討

川谷 卓哉<sup>1,a)</sup> 荒川 豊<sup>2,b)</sup> 峯 恒憲<sup>2,c)</sup>

**概要：**路線バスの運行状況を分析し把握することは、バス輸送サービスの改善に大変有用である。バスから他の交通機関への乗り換えは、バスが道路交通状況や利用客数の影響を受けやすいため、当初想定していた乗り換えスケジュールが成立しないことがよく見られる。本研究では、路線バス走行履歴データから運行状況を算出、解析し、乗り換え利用の満足度を算出する手法について検討した。

## 1. はじめに

路線バスの運行状況を分析し把握することは、バス輸送サービスの改善に大変有用である。路線バスを利用する場合の一例として、駅で鉄道に乗り換えることが想定される。バスと鉄道の運行本数が1時間に4~5本程度である場合、相互に乗り換えを考慮したダイヤを編成することが多い。しかし、鉄道が比較的定刻で運行する一方、バスは道路交通状況の影響を受けるなどして遅延しやすい。そのため、特にバスから鉄道への乗り換えにおいて、本来想定されている乗り換えができない事例が観察される。乗り換え待ち時間が長くなると利用客の満足度が低下する原因ともなる。バスの運行ダイヤは、交通状況を考慮して、時間帯により所要時間設定を変えているものの、遅延が頻繁に発生する場合はさらに調整を実施する必要がある。

路線バスの利便性を向上し、利用客の満足度を高めるための方法が2つ考えられる。第一に、バスの遅延が事前に予測できるようにすることである。これが実現すると、遅延状況に応じて臨機応変に移動スケジュールを組み立てることが可能となる。第二に、運行ダイヤを変更して、乗り換え待ち時間が少なくなるようにすることが考えられる。スムーズな乗り換えができれば全体的な移動所要時間を減らすことができる。

著者らは路線バスの遅延を機械学習を用いて予測する研究を進めている [1], [2]。予測精度が十分かを検討するため

にも、遅延状況を把握することは重要である。たとえば、通常発生する遅延が3分前後の路線において、予測誤差が5分発生するのでは、予測結果の価値がなくなってしまう。

本研究では、路線バスの走行履歴データから運行状況を算出し、運行ダイヤと比較した。遅延の評価は、これまで、利用者の目的を曖昧にしたまま、運行ダイヤとの差の評価だけで行われてきたが、遅延の問題の重大さを測るためには、利用者の目的を明確化し、その達成度合いを基準とすべきである。本研究では、利用者の目的の一つとして、列車の乗り換えを設定し、その目的達成度を評価基準として扱う。運行状況解析の結果、大学から駅方面の運行便については、夕方のラッシュ時間帯において運行ダイヤからの遅延が集中していることを確認した。また、特定の便において遅延が多発することにより、本来乗り換え可能なように設定されている列車への乗り換えができなくなり、長い待ち時間が発生する事例が存在することも確認した。これらの解析結果をもとに、乗り換え利用の満足度を適切に表現できる指標の算出方法を検討した。本論文では、バス自身の遅れのほか、時刻表上で乗り換えが可能な列車に実際に乗り換えができたか、その場合の待ち時間の3つの観点から指標を考案し、算出した。その結果、ダイヤの改善が必要となるバス便の候補を適切に抽出することができた。

ここで、2021年の路線バス運行状況に影響を与える要素として、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は無視できない。COVID-19の影響により、緊急事態宣言期間中の路線バス利用客数が減少するとともに、道路交通量も減少する事態が発生した。運行状況を解析する際に、COVID-19に伴う緊急事態宣言による影響が見られるかどうかを同時に調査した。

本論文の主な貢献点を以下に示す。

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学府  
福岡市西区元岡 744

<sup>2</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究院  
福岡市西区元岡 744

a) kawatani.takuya@m.ait.kyushu-u.ac.jp

b) arakawa@ait.kyushu-u.ac.jp

c) mine@ait.kyushu-u.ac.jp

- 利用者の目的に対する達成度という観点、具体的には、バスから鉄道への乗り換えを目的として定めて、遅延時間や乗り換え待ち時間の観点からダイヤを評価する手法を提案した。
- 先に示した観点を定量的に把握できる評価指標を提案し、実際に算出した。
- 評価指標が低くなった便を抽出し、遅延要因や乗り換え待ち時間が長くなった要因を明らかにした。
- COVID-19に伴う緊急事態宣言による影響を調査した。

以下、2節で関連研究を示す。3節では、本研究に用いた、昭和自動車株式会社の路線バス走行履歴データについて説明する。4節では、本研究に用いたデータの算出法、および統計的検定のための手法について説明する。5節では、運行状況を表す指標が満たすべき条件を示し、条件に合う指標を定義する。6節では、運行状況から基本統計量を算出して観察するとともに、運行状況を示す評価指標を算出して、運行改善が必要な便を実際に抽出した。7節では結果を考察し、最後に8節でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

路線バスの運行状況を解析するアプローチには、代表的なものとして次の3つがある。第一に路線バスの遅延要因を分析するものである。第二に、バスの遅延が利用客の満足度に与える影響を調べるものである。第三に、機械学習を用いた遅延の予測である。

遅延要因の分析を実施したものには、辰巳らの研究 [3]、藤原らの研究 [4] がある。辰巳らは、西日本鉄道株式会社のバス路線の一つを対象として、天候や気温、月、曜日、時間帯の要因からバスの遅延状況を分析している。その結果、バスの所要時間に影響を与える要因として月、曜日、時間帯を見出している。藤原らは、バス運行路線の道路特性とバス運行データを組み合わせて遅延要因を分析している。

遅延時間が利用客に与える影響を分析したものには、小山らの研究 [5] がある。小山らは、遅延時間の分布形状に着目し、どのような分布であるときに利用客からの評価が高い運行となっているかを調査している。その結果、分布の平均値、分散が同等であっても、指数分布や対数正規分布である方が利用客からの評価が高いと結論づけている。

路線バスの遅延状況を解析するアプローチのひとつに、機械学習を用いて遅延を予測するものがある。著者らは先行研究 [1], [2] において、機械学習を利用してバス移動時間の予測を実施している。先行研究において、運行日時、天候、各バス停間の移動時間を特徴量として入力した場合の予測精度の変化を調査し、特定のバス停間の移動時間とともに、バス出発時の運行時間帯を入力すると予測精度が向上することを確認した。また、内村ら [6] は、GPSによる位置情報が記録されるバスロケーションシステムのデータを用いた、バス停間所要時間予測手法を提案している。今

表 1 走行履歴数とシーケンス数

期間	走行履歴数	シーケンス数
2019.04.01 – 2019.06.30	3,423,567	10,403
2020.04.01 – 2020.06.30	2,806,680	9,299
2021.04.01 – 2021.06.30	2,725,723	6,229

井ら [7] は、重回帰分析とカルマンフィルタモデルを用いて、高精度でバス運行状況を予測する手法を提案実証している。

これらに対して、本研究では、バスの遅延状況に着目して統計的解析を実施し、他の交通機関との接続についても考慮した遅延状況の調査を実施している。

## 3. 対象路線とデータセット

本研究で解析対象とした路線は、昭和自動車株式会社（本社：佐賀県唐津市）が運行する九州大学線である。当路線で運行する 42 台の路線バス車両から収集される走行履歴データを利用して解析した。走行履歴データには、車両識別用 ID、走行時刻、緯度、経度、速度が記録されている。走行履歴データは、距離約 200m ごとに記録される。これとは別に、急ブレーキや急ハンドルなどの挙動が発生した場合は、挙動履歴データとして随時記録される。

走行履歴データは 2019 年 2 月から 2021 年 7 月現在に至るまで継続して蓄積されている。本研究に利用したデータは、2019 年の 4 月 1 日から 6 月 30 日、2020 年の 4 月 1 日から 6 月 30 日、2021 年 4 月 1 日から 6 月 30 日までの各 3 か月分、計 9 か月分である。この期間を選択した理由は、COVID-19 による緊急事態宣言の影響を比較するため、また、同一年度内での各月間の状況変化を比較するためである。各期間のデータ数を表 1 に示す。ここで、走行履歴数とは各期間における走行履歴データの総数、シーケンス数とはバスが起点バス停を出発してから終点バス停に到着するまでの走行履歴データ群を 1 つと数えた際の群の数である。

九州大学線は、福岡市西区の九大学研都市駅から九州大学伊都キャンパスまでの約 4km を結ぶ路線である。当路線の運行ルートは 3 つに大別される。本研究に用いたデータの期間における、ルート概要を図 1 に示す。

直近の九州大学線の運行本数変化は表 2 の通りである。走行履歴データおよび挙動履歴データは、現在、九大学研都市駅付近と九州大学伊都キャンパス構内入口の 2 箇所に設置されている路側機によって収集されている。

本研究では、バスから鉄道への乗り換えについて調査するため、九州大学伊都キャンパスから九大学研都市駅方面の走行履歴データを利用した。また、駅における鉄道への乗り換え時間を算出するため、列車の時刻表を取得した。対象となる駅は九州旅客鉄道株式会社（JR 九州）筑肥線の九大学研都市駅である。バスから乗り換えての利用が多

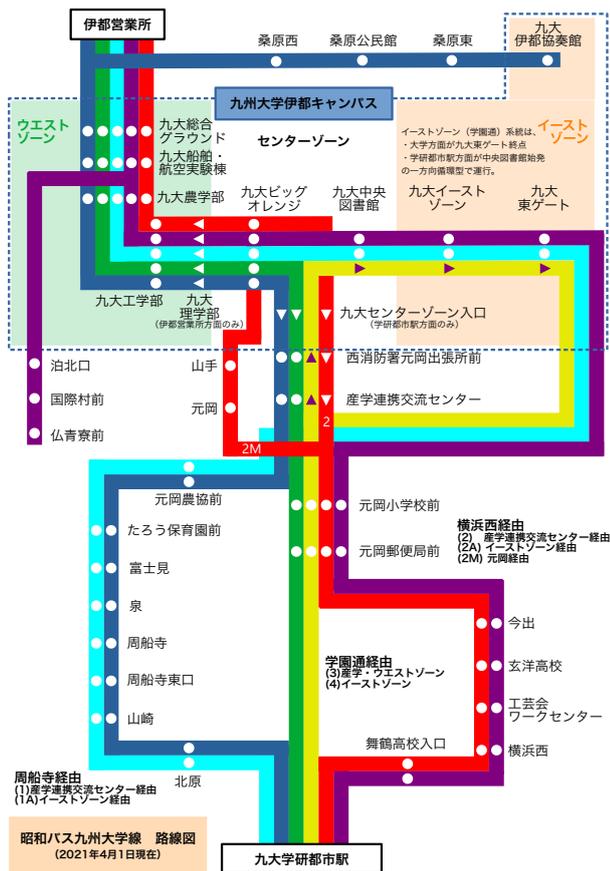


図 1 昭和自動車九州大学線路線図 (2021年4月1日現在)

表 2 九州大学線の運行本数の変化

日時	平日	土曜	日祝
2019.04.01 改正	444	204	174
2019.10.01 改正	366	167	157
2020.04.01 改正	361	162	152
2020.10.01 改正	304	156	146
2021.04.01 改正	240	131	131

い、福岡空港駅方面の時刻表を取得した。

#### 4. データ処理手法

次の手順により、走行記録データからバスの運行実績データを算出した。

##### 4.1 走行記録データからのバス運行実績データの算出

本研究で用いた走行記録データの特性として、速度9 km/h未満で走行、または停車したことが記録されない点が挙げられる。そのため、データからは停車したことを直接に確認することができない。また、走行履歴データにはバス停を通過、もしくはバス停に停車したことを示す情報が存在しない。これらの課題を解決するために、次に述べる手法でデータから停車情報、およびバス停の通過情報を算出した。処理手順概略を図 2 に示す。

まず、元データ (A) の緯度・経度を世界測地系に変換し

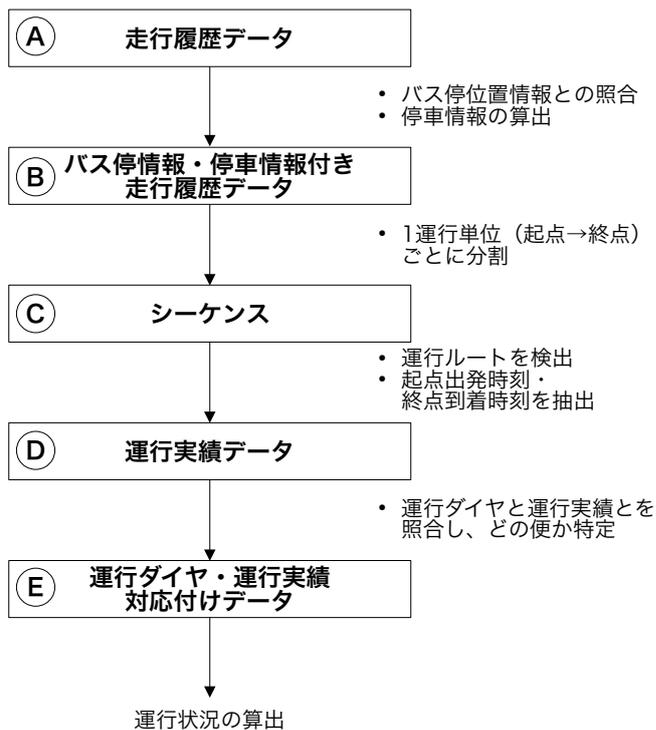


図 2 運行状況算出用データ変換処理手順

た。次に、変換後の走行履歴データとバス停の座標を照合して、バス停の近傍を通過したかどうかを求めた。続いて、バスの起点と終点における発着時刻を求め、バス停情報・停車情報付き走行履歴データ (B) を生成した。本論文では、図 1 に示したルートのうち、伊都営業所・九大総合グラウンドを起点とする九大学研都市駅行きのデータ (B) を算出した。

このようにして得られたデータ (B) を分割してシーケンス (C) を得た。分割単位は、バスが起点バス停を出発してから終点バス停に到着するまでの 1 運行単位を 1 つのシーケンスとする。シーケンス (C) から、各便の運行ルートを決出し、また、起点出発時刻と終点到着時刻を抽出した運行実績データ (D) を算出した。

##### 4.2 運行ダイヤと運行実績データとの対応付け

続いて、バスの運行実績データ (D) を、バス自身の運行ダイヤおよび乗り換え先の鉄道の時刻表と対応付け、データ (E) を生成した。運行実績データ (D) とバスの運行ダイヤとを照合する方法として、起点バス停の所定出発時刻から 2 分後までの間に出発したバスについて、当該の便であると決定する。ここで遅れ範囲を 2 分以内とした理由は、同時発車を除く場合の最小運行間隔が 2 分となっていて、2 分以上の遅れが発生すると便の決定が困難なためである。ここで、

(1) 運行ダイヤに対応する運行実績データが得られなかった便

表 3 対応が取れなかったデータ数

期間	(1)の数	(2)の数
2019.04.01 - 2019.06.30	7,200	1,541
2020.04.01 - 2020.06.30	6,223	2,351
2021.04.01 - 2021.06.30	4,464	1,408

表 4 運行状況算出における時間帯区分

名称	時間帯
朝	6:00 ~ 9:00
午前中	9:00 ~ 12:00
午後	12:00 ~ 16:00
夕方	16:00 ~ 19:00
夜間	19:00 ~ 24:00

(2) 運行ダイヤとの対応が取れなかった運行実績データについては遅延状況が算出できないため計算から除外した。これら対応が取れなかったデータの数を表 3 に示す。

#### 4.3 運行状況の算出

運行ダイヤと運行実績データを対応付けたデータ (E) から、運行状況の算出を次のとおり行った。まず、運行ダイヤ上の到着時刻と実際の到着時刻のずれを遅れの秒数として算出した。次に、鉄道の時刻表との比較結果として、各バス便から乗り換えることができる列車を算出し、さらに、その 1 本前の列車もまた算出した。算出した列車の時刻から待ち時間とその 1 本前からの時間も算出した。

運行状況の算出にあたっては、バス運行時間帯を区別しない場合とともに、時間帯を表 4 に従って分割した場合についても算出した。

#### 5. 運行状況指標の検討

運行状況を適切に表現し、ダイヤ設定を改善すべき便を抽出するための指標を検討する。まず、指標がどのような性質を持つべきかを列挙する。

- (1) 遅延が大きくなったとき、指標の値が大きくなる。
- (2) 列車への乗り換え待ち時間が長くなったとき、指標の値が大きくなる。
- (3) 本来乗り継ぎができる列車の発車時刻から、実際にバスが到着した時刻との間が短いとき、指標の値が大きくなる。

(1) の性質は基本的である。遅れが日常的に発生している場合は、ダイヤを調整する必要がある。遅れがその日時に突発的に発生したものの場合、遅れが発生した便を特定するのに有用である。単純な指標化として、遅延した秒数をそのまま指標の値とすることが考えられる。この指標の利点は、遅延が大きい便を直接に検出することができる点にある。難点は、遅れの度合いが小さくとも、その遅れにより乗り換え利用に不便が生じたことを数値化できないことである。

(2) の性質は、乗り換え利用の利便性を測る場合に重要

になる。この性質を指標化する場合は、たとえば次の列車までの待ち時間から、乗り換えに必要な時間を差し引いたものを指標の値とすることが考えられる。この指標の利点は、長い待ち時間となる乗り換えパターンの場合に数値が大きくなるため、待ち時間を改善すべきパターンを見つけやすい点にある。難点は、バスが遅れることにより対象となる列車までの待ち時間が短くなると指標の値が小さくなってしまいうため、遅れによる悪影響を検出できないことにある。

(3) の性質は (2) と似ているが、こちらは「あとどれだけバスが早ければ、前の列車に間に合っていたか」を表すものである。この性質を指標化する一例は、バスの到着時刻と、バスから間に合う 1 本前の列車の発車時刻との差の逆数を取ることが考えられる。この指標の利点は、少しの時間差で間に合なかった乗り換えを検出できることにある。難点は、この指標を単独で用いると、朝時間帯のように列車が頻発している場合において、実際上は不便がないのに指標の値が大きくなってしまいう点にある。この指標は、列車本数が少ない場合の改善すべきダイヤを検出する場合に有効である。

3つの性質を満たす指標をひとつ作るためには、これら3点の比重を適切に調整する必要がある。単純な数値化の場合、3つの数値が相互に矛盾する作用を起こしてしまうことがある。たとえば、定刻の到着時刻から列車の出発時刻まで 10 分ある場合を考える。このバスが 5 分遅れたとき、(1) の性質によれば遅れた分だけ指標の値が大きくなる。一方で、列車への乗り換え待ち時間が短くなったことを同じ指標に合成して反映してしまうと、改善すべきダイヤが検出できなくなってしまうおそれがある。

本論文では各性質を満たす指標を 1 つずつ、計 3 つ定め、実際に算出する。これらの指標を  $D_1, D_2, D_3$  とすると、

$$D_1 = t_d \quad (1)$$

$$D_2 = T_N - (t_a + G) \quad (2)$$

$$D_3 = t_a + G - T_F \quad (3)$$

で定義する。ここで、 $t_d$  は、バス運行ダイヤ上の到着時刻と実際の到着時刻の差、 $t_a$  は、あるバスが駅のバス停に到着した時刻、 $G$  は乗り換えに必要なとされる時間、 $T_N$  は当該のバスから実際に乗り換えることができる列車の発車時刻、 $T_F$  は当該のバスから時刻表上乗り継げる列車の発車時刻である。本研究では時刻を秒の単位で取り扱い、秒よりも小さい単位を用いない。

これらの指標を説明すると、 $D_1$  はバスの運行ダイヤからの遅れの度合い、 $D_2$  は駅における列車の待ち時間、 $D_3$  は、バスがあとどれだけ早かったら列車に間に合っていたかを示すものである。

本論文では、 $G$  を 180 秒と定めた。これは、九大学研都市駅バス停において、大人の利用者がバス到着と同時に降

車し、一般的な速度で歩いてホームまで移動するのにかかる時間に、さらに1分の余裕時間を加えたものである。この乗り換え時間設定は、各利用者により幅が生じるが、本論文においては一律とした。

## 6. 解析結果

本研究では2019年、2020年、2021年のそれぞれ4月から6月の期間における運行状況を解析した。紙面の都合上、次に示す表やグラフを掲載した。

- バス遅延秒数の詳細を示す表、駅到着時遅延のヒストグラム、および5分以上の遅延発生件数は、COVID-19に伴う緊急事態宣言の影響を比較するため2021年4月から6月を比較。
- 遅延秒数の平均値については、遅延が顕著である朝と夕方について、全期間分を掲載。

### 6.1 遅延状況

2021年4月から6月のバス遅延秒数  $D_1$  について、ルート別に整理したものを表5、表6および表7に示す。ここで、遅延が0秒未満、すなわち駅に早着している事例が存在する。表によると、4月に対して5月や6月は、全路線において遅れの平均値が早着を示す負の値となっている。また、遅れの最大値が小さくなり、さらに標準偏差も小さくなっていった。5月は、福岡県に緊急事態宣言が発表され、それに伴い九州大学では遠隔講義に切り替わった講義が多く、また、課外活動も中止となった。これらの要素が遅延状況の変動に影響を及ぼした可能性がある。

表4に従って時間帯を区分して遅延状況を求めた結果を図3、図4に示す。このグラフから、2020年の4月～6月において、すべての路線で遅延秒数の平均値が負、すなわちバスが終点の駅に早着していることがわかる。なお、2019年の4月～6月において、周船寺・産学連携交流センター経由のルートのみが大幅な遅れを示している。この原因は、当ルートについて時刻設定に問題があり、本来の運行時刻より大幅に短い時刻が設定されていたことにある。また、図3において、2021年の横浜西経由、および周船寺経由のデータが存在しない。これは、2021年4月1日のダイヤ改正によるものである。横浜西経由は、起点側バス停（九大総合グラウンドバス停）をこの時間帯に経由しなくなった。また、周船寺経由は、このダイヤ改正により午前中の運行がなくなり、12時台以降のみの運行となっていた。

2021年4月および5月における、駅到着時点の遅延および早着時間のヒストグラムを図5、図6、図7および図8に示す。早着している事例が半数を占めることがわかる。この理由は、当路線のダイヤが、途中で遅延が発生することを想定して、駅到着時の余裕時間を駅の1つ手前のバス停から駅までの間に設定していることにある。一方で、残

表5 遅延秒数（2021年4月）

	全体	学園通	横浜西	周船寺	周・産学
最小値	-301	-300	-206	-301	-268
平均値	23.66	29.63	-3.88	3.09	29.21
最大値	880	711	335	568	880
標準偏差	145.96	159.65	102.16	111.03	149.53

表6 遅延秒数（2021年5月）

時間帯	全体	学園通	横浜西	周船寺	周・産学
最小値	-315	-276	-192	-267	-315
平均値	-26.68	-33.29	-34.48	-29.87	-21.06
最大値	676	565	228	221	676
標準偏差	107.87	111.45	87.97	89.33	112.32

表7 遅延秒数（2021年6月）

時間帯	全体	学園通	横浜西	周船寺	周・産学
最小値	-311	-311	-206	-287	-264
平均値	-15.89	-32.82	-46.13	-30.19	2.85
最大値	665	405	281	665	470
標準偏差	111.74	111.66	107.00	112.16	95.42

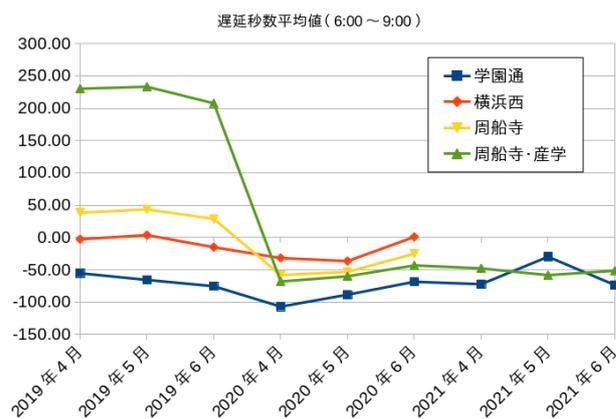


図3 遅延秒数平均値（朝）

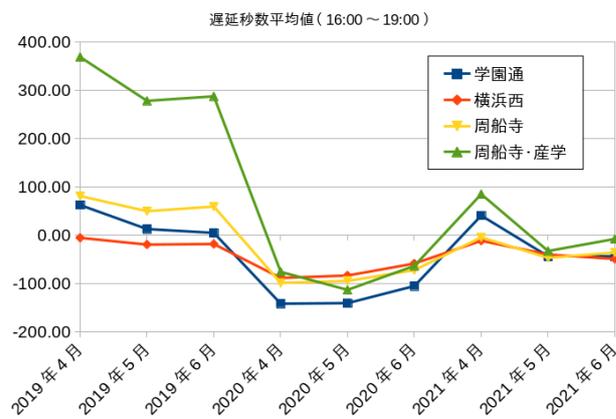


図4 遅延秒数平均値（夕方）

る半数の事例においては、余裕時間の設定にもかかわらず、駅到着時に遅延が発生していた。

2021年における5分以上の遅延発生件数グラフを図9

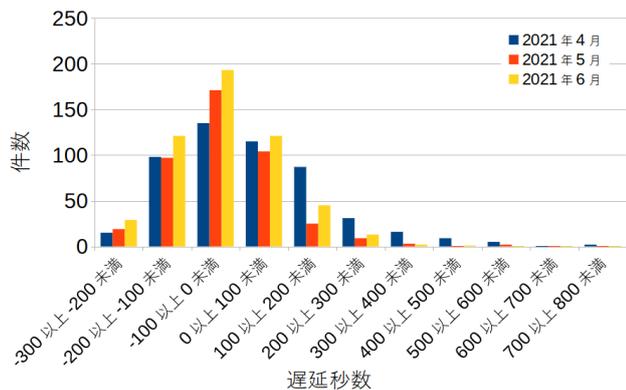


図 5 駅到着時の遅延（学園通経由）

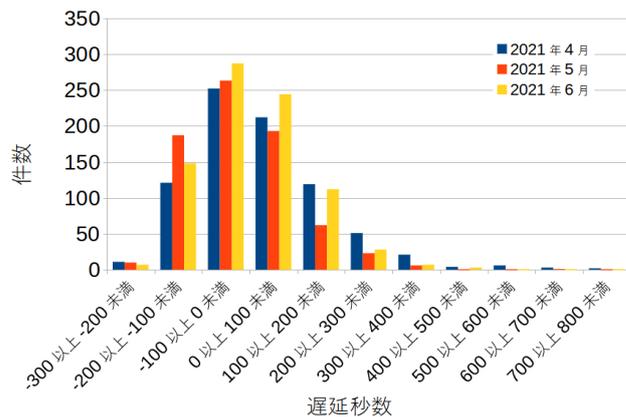


図 8 駅到着時の遅延（周船寺・産学連携交流センター経由）

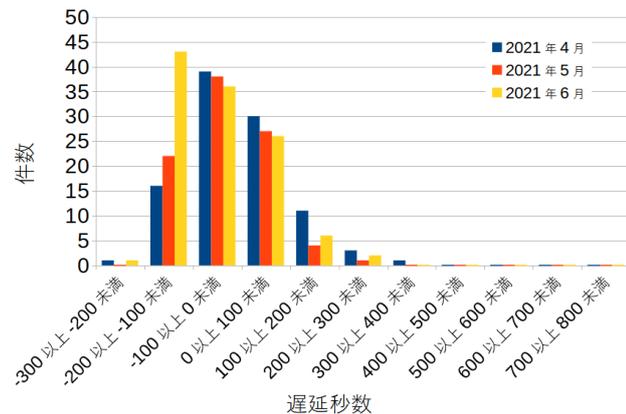


図 6 駅到着時の遅延（横浜西経由）

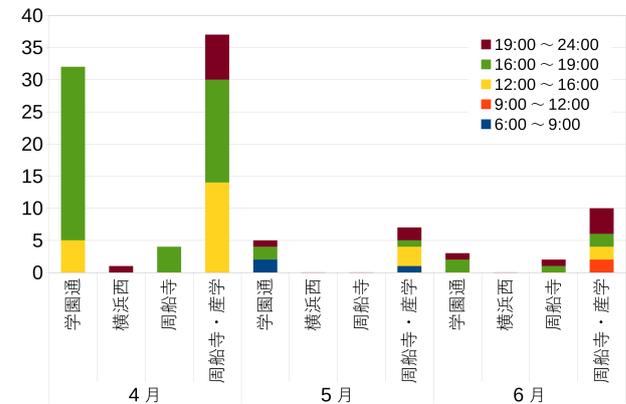


図 9 5分以上の遅延発生件数（2021年）

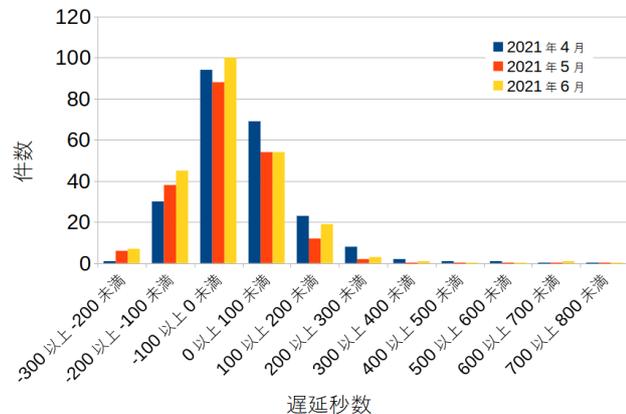


図 7 駅到着時の遅延（周船寺経由）

表 8 乗り継ぎ改善が必要と検出された運行

日付	全運行実績数	抽出件数	時刻表上の便数
2021年4月	2,117	64	25
2021年5月	1,986	25	16
2021年6月	2,126	40	17

に示す。このグラフによると、COVID-19に関する緊急事態宣言が発表されていた期間において、5分以上の遅延件数が大幅に減少していることがわかる。5分以上の遅延は主に大学の講義終了時間（16時20分）後の便において発生していた。

## 6.2 遅延による影響

今回の解析の結果、遅延がただちに列車への乗り換えに影響を及ぼすとは限らなかった。多くの場合、もともとバスの定刻到着時刻から列車の発車時刻までの間に余裕があ

り、たとえ遅延が発生したとしても同じ時刻の列車に乗り継いでいた。一方で、遅延がわずかであっても、乗り継ぎができなくなり、長い時間待たされる事例が見られた。

ここで、乗り換え満足度指標  $D_3$  を2021年4月～6月の運行実績データに対して算出した。 $D_3 > 0$  のとき、改善が必要なダイヤであるとみなす。全運行実績データ中、改善が必要であると抽出された実績数、また、改善が必要とされた運行実績が運行ダイヤ上かかわっている便数を表8に示す。

抽出されたダイヤの中から、最も多く  $D_3$  の値が正となっている便を抽出すると、対象とした3か月間においていずれも特定の1便が共通して最上位に抽出された。九大総合グラウンド19時40分発、横浜西経由九大学研都市駅行きの便は、走行履歴データから抽出できた17日分の運行日のうち、半数弱に及ぶ7日間遅延が検出され、本来接続できるはずの列車に乗り換えられない事例が見られた。

表 9 5分以上の待ち時間がある運行

日付	全運行実績数	抽出件数	時刻表上の便数
2021年4月	2,117	1,062	114
2021年5月	1,986	1,045	121
2021年6月	2,126	1,188	123

### 6.3 駅における待ち時間の長さ

遅延により乗り換え可能な列車が1本後になるような影響が発生する一方で、乗り換え自体は所定の列車に問題なく乗り換えできるものの、駅で長い待ち時間が発生する事例も見られた。このような運行ダイヤも、駅での待ち時間を適切な長さにできるように改善する余地がある。

待ち時間の長さを評価するために、指標  $D_2$  を用いる。ここで、遅延によって乗り換えに影響が起きたバス便を除いて  $D_2$  を算出するため、 $D_3 < 0$  の条件を追加で設ける。また、待ち時間の目安を5分と定める。これは、JR 筑肥線の運転間隔がおよそ15分間隔であるところから定めた。すなわち、 $D_2 \geq 300$  かつ  $D_3 < 0$  を満たすバス便を抽出した。抽出件数を表 9 に示す。表 2 に示した運行本数に照らし合わせて、運行便のほとんどについて、駅での乗り換え所要時間  $G = 3$  分を除いても、さらに5分以上の乗り換え待ちが発生したことがある結果となっていた。ただし、各ダイヤにおける乗り換え待ち発生件数は、ほぼ毎日発生している便がある一方、1か月間に1件しか発生していないような便もあり、大きく幅があった。

乗り換え待ちが発生する件数が多かった便は月により違いがあったが、いくつかの便は上位に位置していた。そのような便のひとつ、九大総合グラウンド18時20分発、学園通経由の九大学研都市駅行きは、ほぼ毎日5分以上の待ち時間が発生していた。

## 7. 考察

### 7.1 遅延が発生しやすい時間帯

6.1節で観察したとおり、時間帯ごとに遅延状況を算出したところ、タラッシュ時間帯ではなくその前の午後時間帯のほうが遅延秒数の平均値および最大値が大きくなっていることがわかった。遅延は4月、5月の午後時間帯について平日に発生しており、特定の日付や曜日に集中している様子は観察されなかった。

### 7.2 遅延が発生しやすい便の運行特性

遅延が発生しやすい便には、次の特性が見られた。

- 大学周辺で数分間停車している。
- ラッシュ時に混雑しやすい国道を通過している。

大学周辺での停車の大部分は、構内にある複数のバス停のうち少なくとも1箇所数分間停車している事例であった。また、大学構内から公道に出る信号交差点を含む区間において、所要時間1分で設定されている区間に7分を要

している事例が見られた。

### 7.3 乗り換えへの影響が出やすい便のダイヤ特性

乗り換えへの影響が出やすいダイヤの特徴として、定刻に到着した場合の乗り換え余裕時間がもともと少ない例が挙げられる。九州大学線は乗り換え先となるJR 筑肥線と比べて本数が多く、バスと列車が1対1で接続するというわけではないものの、列車の発車時刻を考慮して設定されている便が多い。この場合の乗り換え余裕時間と、6.1節で述べた、駅到着時刻の余裕時間を合わせてもなおバスが遅れた場合に乗り換えができなくなる。

### 7.4 遅延要因の検討

バスが遅延する要因として、道路交通が混雑していること、また、利用客の乗降に時間がかかり、バス停に長く停車する事例が挙げられる。遅延が発生している便の途中バス停通過時刻を運行ダイヤと比較した結果、大学構内に存在するバス停で数分間停車したことにより、その遅れを回復しないまま駅まで走行している事例が見られた。また、周船寺を経由するルートにおいて、途中国道を通過する区間で遅れが発生する状況も見られた。

バス路線のルート上には、待ち時間が長い、もしくは混雑しがちな信号交差点が3箇所ある。遅延にはこれらの信号交差点における待ち時間が関わっていると見られる事例が観察された。たとえば、学園通経由のバスが通過する学園通と国道が交差する北原西交差点がある。この交差点は混雑時には通過できる台数が少なくなるため、バスの所要時間が延びる。この交差点を含む、元岡郵便局前バス停から九大学研都市駅バス停間については、運行区間全体の余裕時間をまとめて確保していることもあり、逆方向の大学方面の便では所要時間5分で設定されているところ、所要時間8分(夕方以外)、9分(夕方時間帯)で設定されている。しかし、この区間の実際の所要時間が8分~9分となっていることもあり、元岡郵便局前バス停までの間に発生した遅れは、この区間で解消することができなくなっている。つまり、バスが遅延する要因をまとめると、

- バス停における乗降時間の長さ。
- 道路交通混雑による運行速度の低下。
- 経路上の信号交差点での待ち時間の長さ。
- 路線に設定されている余裕時間を超える遅れの発生となる。

### 7.5 乗り換え待ち時間の評価

本論文では、バスの遅延によって乗り換え可能な列車が変動しない便において、駅でどの程度の待ち時間が発生しているかを、指標  $D_2$  と  $D_3$  によって抽出した。抽出された便の特性を調べると、以下の2つの特性が見られた。

- 列車が発車した直後に駅に到着するようなダイヤが組

まれている。

- たとえ早く到着しても、直前に発車する列車には間に合わない。

JR 筑肥線の運転間隔が約 15 分であるため、前の列車が発車した直後に到着する場合は、確実に 10 分以上の待ち時間が発生する。バスが多く運行されている時間帯であれば、別のバスを選択することによって待ち時間を短縮することが可能だが、本数が少ない時間帯であれば、ダイヤの改善によって待ち時間短縮を実現する必要がある。

## 7.6 運行状況を表す最適な指標

本論文では、乗り換え満足度指標が満たすべき要件を満たす指標  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  を考案し、実際に算出して改善が必要なダイヤを抽出した。抽出されたダイヤは、確かに改善を要するものであり、しかもそのダイヤは特定の便が列挙されていた。また、ある 1 便は算出対象とした 2021 年 4 月から 6 月において共通して最上位に抽出された。

本論文で定義した指標で抽出することができる運行状況以外にも、たとえば途中区間の利用者を考える場合には、途中区間での遅れ状況を見るための指標が必要になる。

## 7.7 ダイヤ編成手法に加えるべき視点

本研究で対象とした九州大学線の運行ダイヤは、駅到着時の余裕時間を駅の 1 つ手前のバス停から駅までの間に設定している。また、運行ダイヤにおける所要時間は、路線・経由地と時間帯ごとに基準を定めて、同一時間帯を運行する便の所要時間はすべて同じ時間で設定している。遅延は時間帯的な傾向によるものと、特定便にのみ生じるものと、両方が存在すると考えられる。時間帯的な傾向による遅延は、駅到着時の余裕時間設定により吸収される。一方で、特定便にのみ生じる遅延は駅到着時の余裕時間設定では吸収されず、駅到着時の遅延として現れると考えられる。

運行状況を従来よりさらに反映した運行ダイヤを編成するには、遅延が発生している特定便に対して、時間帯や路線・経由地による基準ダイヤから遅れを加味したダイヤに変更する方法が考えられる。

## 8. まとめと今後の課題

本研究では、単純にバスの遅延の程度からだけではわからない乗客の満足度を測る指標として、乗客のバスと列車の乗り換え利用満足度を提案し、その度合いを測定するための 3 つの指標を定義した。ついで、バスの運行状況を解析し、3 つの指標の 1 つである運行ダイヤからの遅延の状況を調べるとともに、他の 2 つの指標も考慮して乗り換え利用の満足度を算出した。

その結果、大学から駅方面のバスについて、遅延が午後と夕方に集中していることを走行履歴データから算出した指標  $D_1$  を用いて明らかにした。遅延が発生しやすい便

の運行状況を調べたところ、大学周辺のバス停などで数分間停車していることが遅延の主要因であるとわかった。それ以外に、ルートによっては道路混雑による運行速度の低下、経路上の信号交差点における待ち時間の長さ、各ルートの運行余裕時間を超える遅れが発生している例が見られた。特定の便では、遅延のために時刻表上乗り換え可能な列車への乗り換えができなくなる事例が頻繁に起きていること、それにより長い待ち時間が発生することを指標  $D_3$  により確認した。

さらに、遅延が発生しても乗り換え先の列車が変わらない場合において、ダイヤ設定上、列車が発車した直後に駅に到着するようなダイヤが組まれていること、そのような便は、余裕時間を消費せず定刻より早く到着した場合でも、直前に発車する列車には間に合わないことを指標  $D_2$ ,  $D_3$  の組合せから運行便を抽出して確認した。また、COVID-19 による大学の対面授業の減少、それに伴う利用客数の減少、および道路混雑減少の影響と見られる、遅延発生数の減少を確認した。

今後、途中区間での遅れ状況を分析するための指標をさらに考案し、本論文で定義した 3 つの指標以外の観点から運行ダイヤ改善が必要な便を抽出できるようにしたい。また、乗り換えに必要なとされる時間が人により異なることを反映できるよう、指標の改善を行いたい。

**謝辞** 本研究にあたり、昭和自動車株式会社には、バスの走行履歴データ取得の実証実験に協力を頂き、データ分析の許可を頂いた。また、本研究の一部は科研費 JP19KK0257 および JP21H00907 の支援を受けた。感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 川谷卓哉, 佐藤祐大, 峯恒憲: 高予測精度と低収集コストを実現するためのバスプローブデータ収集地点の選定, 情報処理学会研究報告第 85 回高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), 2021-ITS-85(15),1-7 (2021-05-20), 2188-8965
- [2] T. Kawatani, T. Yamaguchi, Y. Sato, R. Maita, T. Mine, *Prediction of bus travel time over intervals between pairs of adjacent bus stops using city bus probe data*, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Vol.19, pp.456-467 (2021).
- [3] 辰巳浩, 大野雄作: バスプローブデータを用いた路線バスの予想所要時間に関する基礎的研究, 都市政策研究 第 9 号, pp.79-86, 2010.03
- [4] 藤原由美恵, 花田智, 白石陽: 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, 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, 3-395-3-396, 2016.
- [5] 小山真弘, 岩倉成志, 柳下浩: 路線バスの遅延時間の分布形状に着目した時間信頼性評価, 土木学会土木計画学研究・論文集第 33 巻, I-793-I-799, 2016.
- [6] 内村圭一, 成松裕介, 衛藤旭秀, 胡振程: バスロケーション情報をを用いたバス停間所要時間予測, 国際交通安全学会誌 Vol.32 No.3(2007).
- [7] 今井瞳, 廣井慧, 河口信夫: 複数事業者の路線バス運行実績データに基づく到着時刻予測モデルの提案と精度検証, 情報処理学会研究報告 Vol.2017-ITS-71 No.23(2017).