

路線バスの旅行時間信頼性と その影響要因に関する基礎的研究

折部 雄太¹・藤原 章正²・張 峻屹³・力石 真⁴・瀬谷 創⁵

¹ 学生会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
E-mail: m161711@hiroshima-u.ac.jp

² 正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

³ 正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
E-mail: zjy@hiroshima-u.ac.jp

⁴ 正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

⁵ 正会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)
E-mail: hseya@people.kobe-u.ac.jp

バスプローブデータを用いた研究は、データの入手制約から非常に限られたものとなっている。本研究では、広島県バス協会から入手したバスプローブデータを用いて、複数のバス路線におけるバス停間の遅延伝播に関する実証分析を行う。バス停時刻と通過時刻の差分で定義された遅延時間に対する統計分析の結果、始発からの距離が増加するにつれて遅延が蓄積されることが明らかになった。また、平日夕方、土曜日、平均交通量も、遅延を悪化させる方向に寄与することが示唆された。さらに、分位点回帰の結果から、大きな遅延が発生しやすい時間と平均的な遅延が発生しやすい時刻が異なる可能性が示唆された。

Key Words: bus probe data, travel time reliability, late arrival, quantile regression

1. はじめに

近年の情報通信技術の進展に伴い、ETC2.0 プローブデータ、商用車プローブデータ、民間事業者が収集したプローブデータ、タクシープローブデータ、バスプローブデータ等、いわゆる交通ビックデータが利用可能になっている。これらのデータは、多くの場合サンプルベースのデータではあるものの、GPS やジャイロから特定された緯度経度情報を 24 時間 365 日観測しているという点において、高い時空間解像度を有している。この特徴から、旅行時間信頼性の解析¹⁾や、詳細な経路選択情報を活用した経路選択行動の解析²⁾³⁾など、既存のデータでは観測が困難であった交通現象の解析が進みつつある。

一方、上述の交通ビックデータの利活用については、様々な課題が残されている。第一に、大量データの高速処理、マップマッチング手法の改善、既存データとの組み合わせ方法など、技術的に解決すべき課題が残されている⁴⁾。第二に、交通運用や交通計画段階での交通ビックデータの活用方策を検討する必要がある。

本研究では、路線バスの旅行時間信頼性に焦点を当てた実証分析を行う。路線バスの旅行時間信頼性は、自家用車のそれとは以下の 2 点において異なる。第一に、経路、時刻ともに固定されている点が挙げられる。第二に、一度遅れが発生すると、終着バス停に至るまで遅延が伝播する可能性が高い。旅行時間信頼性の研究については、近年多くの研究蓄積があるものの¹⁾⁵⁾、以上のような路線バスの特徴に焦点を当てた旅行時間信頼性に関する分析事例は、筆者らの知る限り限られている。

そこで本研究では、広島市の特定バス路線を対象に、(1) バスの遅延実態の基礎集計分析、(2) 回帰モデル及び 50, 75, 95% 分位回帰モデルによる要因分析を行う。路線バスの遅延に影響を与える影響因子としては、曜日、時間帯、道路構造 (信号機数) などが考えられる。本研究では、まず、バス停ごとに時刻表と実際の到着時間との差を集計し、バス停における遅延時間を算出する。次に各バス停ごとに遅延時間を集計し、回帰モデルと分位点回帰モデルを用いて遅延回復や遅延増加の要因の説明可能性について検証する。

本研究は、以下のように構成される。第二章では、既往研究をレビューし、本研究の特徴を明らかにする。第三章では、使用するデータの概要を述べ、バスの遅延時間に関する幾つかの集計を行う。第四章では、分位点回帰モデルの概要を説明し、遅延時間モデルの推定結果を考察する。第五章では、本研究の成果をまとめるとともに、今後の課題を整理する。

2. 既往研究のレビュー

交通サービスが提供すべき重要な機能の一つとして、速達性が挙げられる。速達性は、旅行時間の平均値だけでなく、その経時的ばらつき、すなわち、旅行時間が読めないことに起因する時間損失にも影響を受ける。近年、このような旅行時間の経時的ばらつきによる経済的・社会的損失について、旅行時間信頼性を鍵概念に様々な理論的・実証的研究が進められている。旅行時間信頼性に関する既往研究については、中山・朝倉³⁾にまとめられているため、以下では、バスプローブを用いた既往研究に限定して整理を進める。

永廣・宇野ら⁴⁾は、道路交通のサービスレベルを評価するためのネットワークの所要時間信頼性に関する評価手法をバスプローブデータを用いて行っている。この研究では、バスプローブデータにバス停停止に伴う遅れ時間の補正を行い旅行時間分布の特性、すなわち、区間旅行時間分布は左側の立ち上がり之急で、右側は比較的なだらかであることを明らかにしている。このことは、遅延時間に大きなばらつきがあることを示唆している。

酒井・塚田ら⁵⁾は、路線バスに追従する車両とそうでない車両との旅行速度の比較を行っている。全体的に追従していない車両の旅行速度が大きいものの、一部バスに追従する車両がそうでない車両の速度を上回るケースが観測されている。この原因として、彼らは、サンプル数が少ないことにより、信号等での停止の有無の影響が大きく出ている可能性を指摘している。またバス停での停止挙動によって発生する、減速時間、バス停停車時間、加速時間などのロス時間を除いた補正バス旅行速度を算出し、対象区間全データについて補正によってどの程度旅行速度が影響しているかを調べた結果、バス停での停車・加減速の影響を受けないデータが約 88%あり、残り 12%のデータについては影響を受けていることが確認されている。加えて、酒井・塚田らは対象区間を走行するのに要した所要時間について、バス時刻表とバス・一般車両のプローブデータ結果を比較している。結果として、通勤時間（朝ピーク時間帯）ではすべてのデータについてバス時刻表との差が大きく、日常的にバスの遅れが発生していることを確認している。一方でオフピーク時に

はほぼ時刻表通りの運行がなされていることが確認されている。さらに、酒井・塚田らでは、一般車両に比べてバスは、旅行時間の信頼性が高いことが示されている。このことは、バスの運行管理、とりわけ時刻表の作成において、旅行時間信頼性への配慮されている可能性を示唆している。

表-1 データ概要

データ	広島県バス協会が保有するバス プローブデータ
総 GPS 測位点数	3,311,583
使用測位点	602,571 [バス停数×運行便数/日× 観測日数 (欠測有)]
対象バス停数	26
便数 (1 日)	平日 95 便, 土曜日 88 便, 日曜 日・祝日 88 便
データ期間	2015/4/1~2015/12/30



図-1 対象路線図（観音マリーナホップ～広島駅）

3. 使用データの概要及び集計分析

データ概要、分析対象路線（広島電鉄3号線）を表-1及び図-1にそれぞれ示す。分析には広島県バス協会が有するバスプローブデータを使用し、今回は観音マリーナホップ発、広島駅着の郊外から都心行きの1路線を分析対象とする。

図-2、図-3に当該バス路線の各バス停での遅れ時間（=実測到着時刻-時刻表上の到着時刻）を示す。ここでは、特に遅延が顕著なピーク時として18時台での各バス停での遅延状況と、遅延状況が穏やかなオフピーク時の代表として21時台での箱ひげ図を示す。以下、図より確認できる知見をまとめる。

第一に、平均的な遅れ時間に着目すると、ピーク時とオフピーク時の間では遅れ時間に大きな差異は見られず、最大 3 分程度の差であることが確認された。一方で、遅れ時間のばらつきに着目すると、ピーク時では 5%の確率で 15 分以上の遅れが発生する可能性があるのに対し、オフピーク時ではそのような大幅な遅延はほとんど発生していないことが確認された。

第二に、終着に近づくにつれ、遅れ時間の平均値、ばらつきともに大きくなる傾向にあることが確認された。このことは、始発に近いバス停において発生した遅延が続くバス停に伝播する可能性があることを示唆している。またこのことは、路線長が長い場合において、旅行時間の信頼性が低下しうることを示している。

第三に、第二とは対照的に、特定のバス停（観音本町等）において遅れ時間が減る傾向が確認できる。このような遅れ時間を調整可能な通過点を設けることにより、旅行時間の信頼性が高まる可能性がある。

次に、図4及び図5に広島駅（終着）とその稲荷町（1つ前のバス停）までの旅行時間をバス運行便別に示す。図より、(1) 稲荷町においては時刻表上の旅行時間は実測旅行時間の 5%分位点に概ね一致する一方、広島駅においては時刻表上の旅行時間は実測旅行時間の 95%分位点に概ね一致する傾向が見られること、(2) 一方、朝夕のピーク時においては、実測旅行時間が時刻表上の旅行時間を大きく上回る傾向にあること、が示された。(1)の結果は、酒井・塚田ら⁹⁾の観測結果と整合的であり、旅行時間信頼性を高める工夫が既になされている可能性を示唆している。一方、(2)の結果は、そのような対応が時間帯毎にきめ細かく行われているわけではないことを示唆している。

4. バス遅れ時間モデルによる分析

上述したように、本研究では、回帰モデル及び分位点回帰モデルを用いてバスの遅れ時間に寄与する要因分析を行う。回帰モデル及び分位点回帰モデルの基本式は、以下で与えられる。

$$y_i = \mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta} + \varepsilon_i \quad (1)$$

ここで、 y_i は目的変数(本研究ではバスの遅れ時間)、 x_{ik} は説明変数、 β_k はパラメータ、 ε_i は誤差項を表す。回帰モデルの場合、誤差項 ε_i の期待値は 0 と仮定し、次のような最小二乗推定量 $\hat{\boldsymbol{\beta}}_{LS} = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \sum_{i=1}^n (y_i - \mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta})^2$ を得る。一方、分位点回帰の場合、誤差項 ε_i に、期待値ではなく分位点に対して制約を設けて推定量を得る。具体的には、 \mathbf{x}_i のもとでの ε_i の条件付き分布 $\varepsilon_i | \mathbf{x}_i$ が 100 τ %分位点 ($0 < \tau < 1$) になるとして、以下の推定

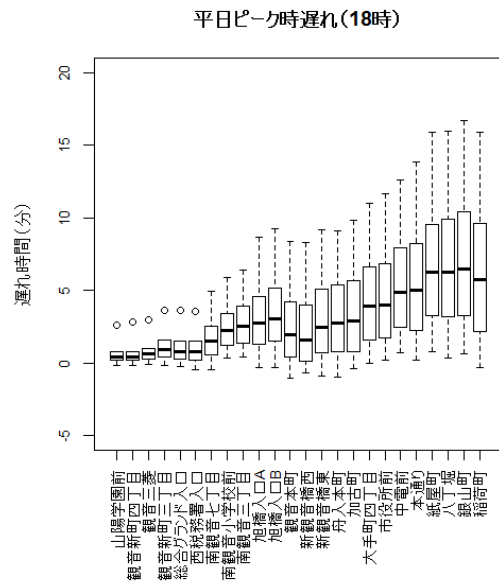


図-2 バス停毎の遅れ時間の箱ひげ図（平日ピーク時）

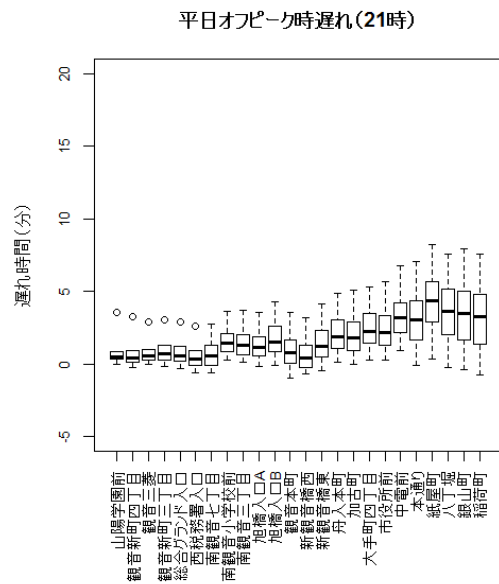


図-3 バス停毎の遅れ時間の箱ひげ図（平日オフピーク時）

量を得る。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_{\tau} = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(y_i - \mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta}) \quad (2)$$

ここで、 $\rho_{\tau}(a) = a(\tau - I\{a \leq 0\})$ であり、 $I\{\cdot\}$ は指示関数である。本研究では、50%、75%、95%と複数の分位点を設定することで、バスの遅れ時間の分布特性の把握を試みる。

バスの遅れ時間を目的変数とした回帰モデル（遅れ時間の平均値に対する回帰）及び分位点回帰モデル（遅れ時間の 50%、75%、95%分位点に対する回帰）の結果を表-2 に示す。以下、主な知見をまとめる。

第一に、表より、ピーク時間帯ダミー(通勤ラッシュ、帰宅ラッシュ)による影響が大きい 8 時台ダミー、18

時台ダミー)は、回帰モデルよりも 95%分位回帰モデルにて大きな値をとっており、遅れ時間の平均値の増大よりも最大遅れ時間の増大に寄与していることが確認された。

第二に、累積信号数は、50%分位点、75%分位、95%分位点となるにつれパラメータの値は大きくなることが示された。このことは、信号が大幅な遅延の発生に寄与している可能性を示しており、従って、信号により旅行時間信頼性が低下しうることを示唆している。(2)より、バスの運行に合わせた信号制御により、旅行時間信頼性を向上させることができる可能性が示唆された。

月別では、4月と比較して6,7月において遅延が発生しにくいこと、また、11,12月において大幅な遅延が発生する結果となった。

5. おわりに

本研究では、まず広島市バス協会が保有するバスプローブデータを用いて単純集計を行い、時間帯、曜日別の遅延状況を明らかにした。次に路線バス遅延時間を目的変数としたモデルを構築した。これらのモデルの構築にあたっては、遅延に対する平均的影響を確認する回帰モデルに加え、大幅な遅延に寄与する影響要因を確認する95%分位点回帰モデルを構築した。

得られた知見は以下のとおりである。

まず、集計分析からは路線バスの遅延が時間帯によって大きく異なることが確認された。特に朝(8:00)、夕(18:00)での遅延のばらつきが大きく、時間帯によって路線バスの旅行時間信頼性は大きく変わることが確認された。またバス停ごとにみれば始発から遠ざかるほど、つまりは今回では都心に近づくほど遅延が大きくなっており、終着バス停に近いバス停ほど旅行時間信頼性が低下することが示された。しかしながら、すべてのバス停で遅延が増加しているのではなく、特定のバス停では、遅延が減少する傾向にあるバス停が観測された。

また、回帰モデル分析の結果は、集計の結果と概ね整合的な結果が得られた。時間帯では一般的に交通量が多い朝、昼、夕に遅延が集中することが示された。天候別では降雨時に遅延に有意に働く結果となった。また、分位点回帰分析の結果、特に夕(18:00)周辺の時間帯や雨天時に大幅な遅延が発生することが確認された。さらに、累積信号数が旅行時間信頼性の低下に寄与していることが確認され、バスの運行に合わせた信号制御が旅行時間の信頼性向上に寄与することが改めて示唆された。

今後の課題を以下に列挙する。

第一に、GPSデータのクリーニングについて更なる検討が必要である。具体的には、本研究では遅延時間の算出に当たって50mバッファ内の最小時間を当該バス停の到着時刻としたが、精度の向上のためには、(1)マップマッチング、(2)バス停通過時間の内挿が必要である。

第二に、今回は累積距離や累積信号数といったデータを説明変数として用いたが、その他の遅延の発生要因として、当該時間帯の交通需要や団子運転等が考えられる。これらの要因の影響についても今後確認する必要がある。

第三に、非混雑路線を含む他路線を対象とした分析を進め、本研究で得られた結論(累積距離の影響や累積信号数の影響)の妥当性や一般性を確認する必要がある。

第四に、バス停での停車時間と遅延時間を分離する必要がある。そのためには、現在の100m間隔のGPSデータのみでは足りず、別途取得されているバスごとのドア開閉データが必要である。

発表当日は、他路線を対象とした分析結果をあわせて発表する予定である。

謝辞

本研究は中国地方整備局広島国道事務所との共同研究「交通ビッグデータを活用した交通分析に関する研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 中山晶一郎, 朝倉康夫: 道路交通の信頼性評価, コロナ社出版, 2014.
- 2) Mai, T., Fosgerau, M., and Frejinger, E.: A nested recursive logit model for route choice analysis, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 75, pp. 100-112, 2015.
- 3) Fosgerau, M., Frejinger, E., and Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, pp. 70-80, 2013.
- 4) Luo, Q., Auld, J., and Sokolov, V.: Addressing Some Issues of Map-Matching for Large-Scale, High-Frequency GPS Data Sets, *TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers*, 2016.
- 5) 永廣悠介, 宇野伸宏, 飯田恭敬, 田村博司, 中川真治: バスプローブデータを利用した所要時間信頼性手法の構築, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 31, CD-ROM, 2005.
- 6) 酒井秀和, 塚田幸広: バスプローブに関する基礎的研究, *土木技術資料*, Vol. 48, No.11, pp. 54-59, 2006.
- 7) 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-P86, 2010.

始発バス停から稲荷町までの旅行時間(分)

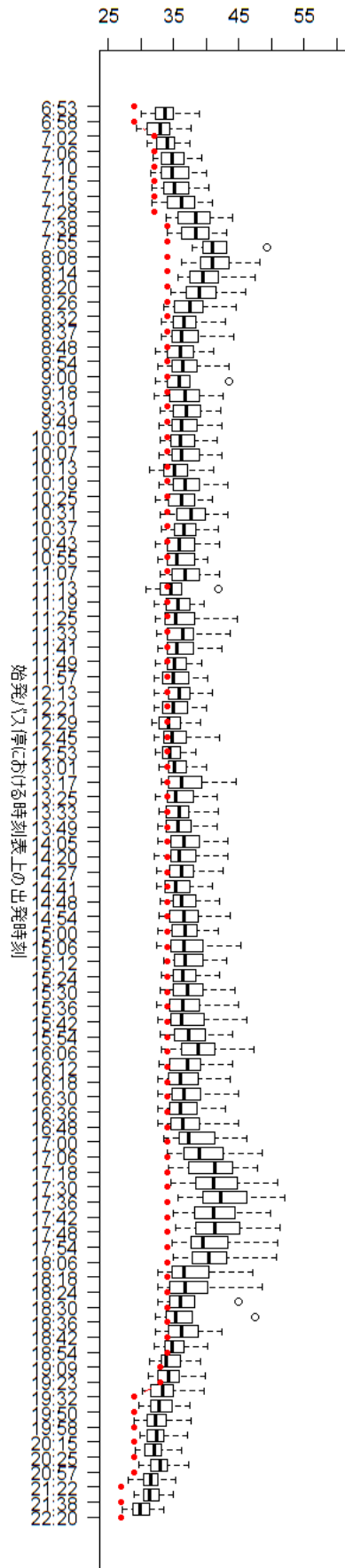


図4 バス運行便別の旅行時間と時刻表との比較(稲荷町)

バス運行便別の旅行時間(広島駅)

始発バス停から広島駅までの旅行時間(分)

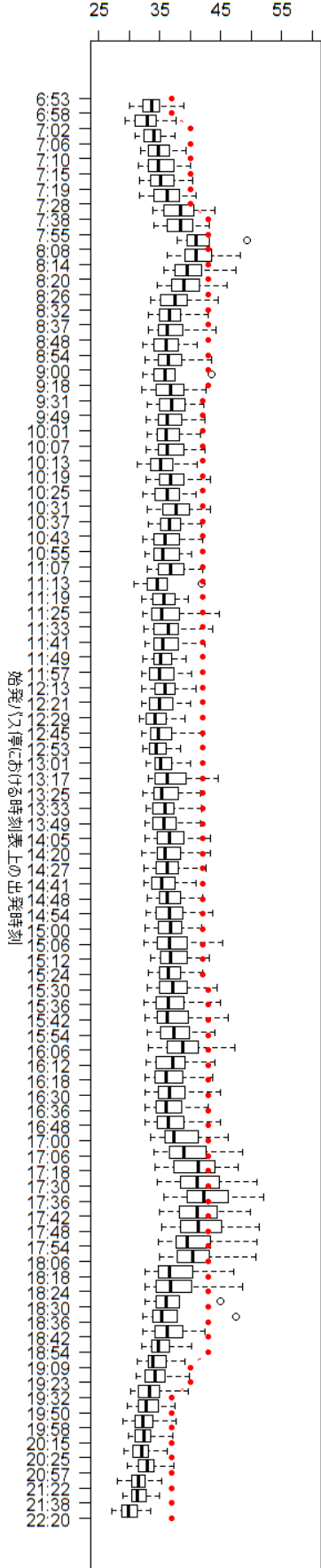


図5 バス運行便別の旅行時間と時刻表との比較(広島駅)

表-2 遅れ時間モデルの推定結果

説明変数	回帰モデル			50%分位点回帰モデル			75%分位点回帰モデル			95%分位点回帰モデル		
	パラメータ値	t値		パラメータ値	t値		パラメータ値	t値		パラメータ値	t値	
定数項	-1.489	-29.33	**	-0.365	-19.24	**	0.139	5.78	**	0.765	19.31	**
6時台ダミー	0.000	-		0.000	-		0.000	-		0.000	-	
7時台ダミー	0.050	0.99		-0.059	-3.15	**	-0.151	-6.36	**	-0.004	-0.09	
8時台ダミー	1.002	19.73	**	0.361	18.56	**	0.669	24.12	**	2.603	41.01	**
9時台ダミー	0.514	9.98	**	0.180	9.11	**	0.178	7.08	**	0.826	15.96	**
10時台ダミー	0.100	1.97	*	0.034	1.82	+	-0.085	-3.60	**	-0.032	-0.85	
11時台ダミー	0.203	4.01	**	0.036	1.92	+	-0.050	-2.13	*	0.275	6.81	**
12時台ダミー	0.344	6.73	**	0.085	4.44	**	0.017	0.69		0.395	9.08	**
13時台ダミー	0.251	4.90	**	0.034	1.71	+	-0.016	-0.63		0.425	8.97	**
14時台ダミー	0.202	3.96	**	0.023	1.23		-0.024	-0.96		0.257	5.99	**
15時台ダミー	0.259	5.13	**	0.019	1.03		0.001	0.04		0.548	12.48	**
16時台ダミー	0.834	16.44	**	0.349	17.84	**	0.560	21.34	**	1.681	33.95	**
17時台ダミー	1.423	28.04	**	0.695	33.65	**	1.270	43.97	**	2.830	55.33	**
18時台ダミー	1.690	33.25	**	0.710	33.03	**	1.574	47.37	**	3.990	60.83	**
19時台ダミー	0.254	4.95	**	0.038	1.82	+	0.178	6.70	**	0.793	15.57	**
20時台ダミー	0.155	2.97	**	0.054	2.65	**	0.003	0.12		0.307	6.15	**
21時台ダミー	0.116	2.17	*	-0.056	-2.79	**	-0.237	-9.53	**	0.107	1.59	
22時台ダミー	-0.097	-1.66	+	-0.138	-6.42	**	-0.377	-15.02	**	-0.358	-5.40	**
土曜日ダミー	0.532	49.01	**	0.287	41.91	**	0.360	34.84	**	0.659	22.31	**
日曜祝日ダミー	-0.204	-21.63	**	-0.178	-33.30	**	-0.251	-34.06	**	-0.194	-8.17	**
4月ダミー	0.000	-		0.000	-		0.000	-		0.000	-	
5月ダミー	-0.280	-18.31	**	-0.139	-15.59	**	-0.223	-19.47	**	-0.375	-14.16	**
6月ダミー	-0.312	-20.35	**	-0.299	-32.29	**	-0.314	-26.62	**	-0.181	-5.65	**
7月ダミー	-0.301	-19.81	**	-0.273	-29.32	**	-0.305	-26.20	**	-0.241	-8.41	**
8月ダミー	0.254	16.59	**	0.008	0.86		0.013	1.03		0.433	12.50	**
9月ダミー	0.005	0.34		-0.016	-1.67	+	-0.021	-1.65	+	0.018	0.61	
10月ダミー	0.001	0.06		-0.025	-2.89	**	-0.038	-3.08	**	0.048	1.51	
11月ダミー	0.459	29.76	**	0.131	13.58	**	0.175	13.02	**	0.865	19.61	**
12月ダミー	0.579	36.87	**	0.216	21.88	**	0.345	23.07	**	1.463	27.55	**
累積信号数	-0.064	-45.92	**	0.008	8.96	**	0.059	52.01	**	0.153	47.94	**
累積距離(km)	0.950	132.02	**	0.470	121.56	**	0.490	104.90	**	0.460	31.47	**
サンプル数	602542			602542			602542			602542		
決定係数	0.2373			-			-			-		

** : 有意水準 1%, * : 有意水準 5%, + : 有意水準 10%