

交通ICカードを用いたバスサービス 評価に関する研究

Nguyen Thanh Tinh¹・倉内文孝²

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail:s3121009@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193岐阜市柳戸1-1)

E-mail:kurauchi@gifu-u.ac.jp

近年、交通ICカードの導入が進んでいる。これらのカードでは固有のカードIDが付与されており、個人の時系列的な行動を追跡できることはもちろん、さらに路線、車号、バス停などのバスの運行の情報も記録される場合、それらのデータを用いることで、バスの運行履歴を再現することができ、バスサービス評価にも有効といえる。

本稿では、日本のある地方都市の交通ICカードによる乗降記録を用いバスの軌跡を再現し、所要時間やバス定時性指標との関係を考察することで、バスサービス評価を試みる。

Key Words : *bus service evaluation, Smartcard data, bus bunching*

1. はじめに

モビリティの高い社会の構築のためには万人が利用可能な公共交通の利便性確保が重要である。そのために利用需要が合致したサービスを提供しなければならない。しかしながら、乗客需要は変動することは周知の事実であるため公共交通需要の把握は容易ではない。そもそもなぜ変動するのか。天候、日々の人の行動などがその要因と考えられる。それを理解することが、公共交通事業者がよりよい公共交通サービスを提供するために必要だといえる。

また、乗客の行動は日ごとにまたは時間的に変動するため、できる限り頻繁に調査し需要の変化を把握しておくことが望ましい。そのようなデータを収集する際には、詳細な質問への回答を依頼しなければならないが、データの信頼性および継続性の面からも問題が多い。さらにこのような調査を一交通事業者が実施することは不可能である。

一方で、近年交通ICカードの導入が盛んでいる。2001年にJR東日本が導入したSuicaを皮切りに、ICOCA、PiTaPaなどの普及が進んでいる。これらのカードでは固有のカードIDが付与されており、それを用いることで個人の時系列的な行動を追跡できる。これらのデータを活用すれば、上記のような交通需要を理解するための手段

として、交通ICカードは非常に有効といえる。

さらに、交通ICカードデータを用いてサプライサイドの評価を行うこともできる。カードがカードリーダーにかざされる際に時刻だけでなく路線、車号、バス停などの情報も記録されている場合、バスの運行履歴を再現することができ、バスの定時性評価やそれと需要の変動についても分析できるだろう。

以上のような背景の元に、本研究では、バス事業者が乗客ニーズを把握し、よりよいサービスを提供可能となるように、交通ICカードを用いバスサービス評価することを目的とする。本稿では、バス停間の所要時間変化、乗降人数とバス停停車時間の関係、バスサービスの定時性評価について、分析を進めた結果を報告する。

2. ICカードデータの概要

Kurauchi et al¹⁾は、2011年9、10月の2ヶ月間の日本のある地方都市のICカード乗降車記録を用い、バス交通に関する需要の変更を理解するための分析を行った。該当都市の人口は約40万人、200km²の都市面積である。データセットには82,320のICカードにより記録された2,100,285のレコードが含まれている。分析に利用したデータセットの利点は、次のように要約される。

1) カードIDが保持されているため、個人の行動を追跡

することができる。

- 2) バスが市内の主要交通機関である。
- 3) カード利用率はおおよそ70%である。
- 4) 市内中心部は均一料金であるが、郊外部は距離性運賃となっており、さらにほとんどのバスが均一運賃範囲を超えて路線設定されている。そのため、乗客は乗車時、降車時の両方でリーダにかざす必要があり、乗降バス停を識別することができる。

交通ICカードシステムは、主にこの地域で唯一の路線バス事業者によって運用されている。また市が独自に運行しているコミュニティバスサービスにも使用することができる。バスネットワークの運賃システムは、市街部区間で200円の均一料金であり、その領域から離れると距離制運賃となる。バス利用者が降車時にカードをリーダにかざすことでカードから運賃が差し引かれる。コミュニティバスサービスの場合には、100円の均一料金区間が適用されるため、バス利用者は乗車時に一度リーダにかざせばよい。データセットには、路線バス及びコミュニティバスデータが記録されている。ICカードデータに記録されている情報は、表-1の通りである。

3. 所要時間変動の評価

まず、路線の所要時間変動の評価について試みる。ここでは対象地域内で乗降者数が最も多い、バス停間を対象とし、ICカードデータから所要時間の変化を取得する。ODペア間に運行するルートを表-2にとりまとめた。

まず平日のみルートごとに曜日別、時間帯別によって所要時間の平均が異なるかどうかを算出してみた(図-1、図-2参照)。図-1より、曜日ごとのバスサービス(所要時間)は比較的安定しているといえる。所要時間の短い順に並べると、ライン3、ライン4、ライン2、ライン1となる。運行距離が長いライン1の所要時間が最も長い。また、ライン1、ライン2、ライン4を比べると、停車バス停が少ないほど所要時間が短縮できる。往路と復路を比較すると、ライン1とライン4では復路所要時間が長い傾向にある。

次に、時間帯ごとの所要時間を示した図-2をみると、全体的に朝時間帯と夕方時間帯に所要時間が長いことが

表-1 データ概要

期間	2011年9, 10月の2ヶ月
データ数	2,100,285レコード, 82,320のICカードID
データ概要	カードID, 乗降日時, 乗降バス停, 車号, ルート名

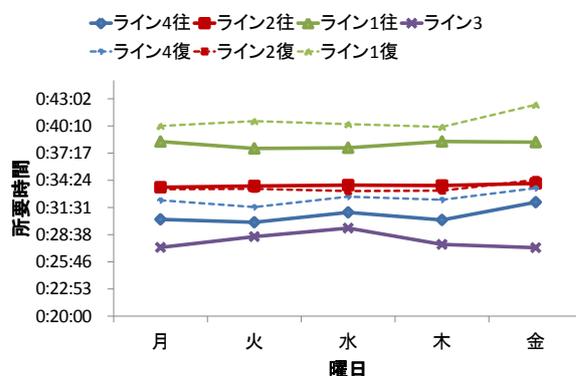


図-1 曜日別所要時間の平均

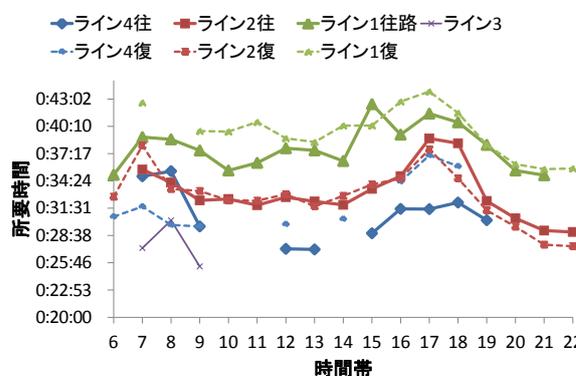


図-2 時間帯別所要時間の平均

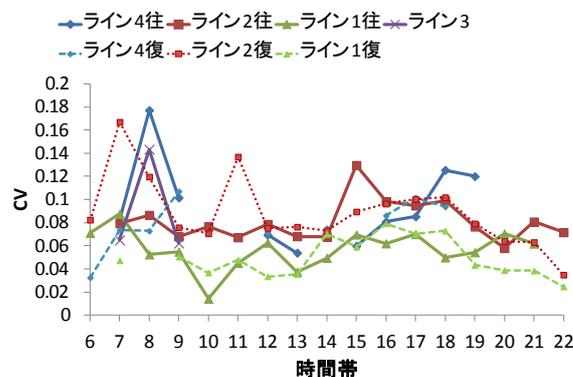


図-3 時間帯別所要時間のCV(変動係数)

表-2 ODペア間のルート

ルート	往復	概要	バス停	運行頻度
ライン1	往・復	運行距離が長い(別ルート)	9個(別ルート)	平日およそ1時間当たり3-4便
ライン2	往・復	ライン4と同様なルートであるが、停車バス停が多い	10個	平日およそ1時間当たり3-4便
ライン3	往	朝時間帯のみ運行される快速直行バス	起終点のみ	朝時間帯(7時~9時)
ライン4	往・復	快速便	5個	平日およそ1時間あたり1便

往路：駅から大学へ向かう方向，復路：往路の逆方向

わかる。また、夕方のピーク時の方が、若干所要時間が長いようである。ただし、往復で時間に大きな差があるわけではなかった。車の密度が高い時間帯であり、道路混雑などの外部要因のためと考えられる。なお、運行本数が限定されているライン4については、一部図中にデータがないところもある。また所要時間の変動係数をみると（図-3参照）、ライン4の所要時間が短い、安定的であるとはいえないようである。

以上のように、交通ICカードデータからバスの運行時間を算出することができ、また得られた結果から曜日や時間帯別のサービスレベルを検証することができることが示された。

4. 乗降時間と車頭時間間隔

(1) データ概要

次に、数多くの系統が同じ道路区間を利用する区間でのバス停間の乗降記録からバスサービスを再現することとする。対象ルートは駅へ向かう方向を対象とした（図-4）。対象路線上のバス停間の距離を表-3に示す。対象ルートは朝時間帯にバスバンチングの現象がよく観測されるといわれている区間であり、それが交通ICカードデータからも読み取れるかどうかを調べる。

(2) バス停での乗降時間と乗降者数の関係

まず、バス停での停車時間を定義する。ICカードデータから、乗降日ごと、路線系統ごと、車号ごと、バス停ごとに、交通ICカードに記録されている時刻の最小値と最大値を求め、最小値と当該バス停への到着時刻、最大値を出発時刻とする。また、この間に処理のあった数を乗降者数とする。なお、実際の到着時刻および出発時刻は、現金処理の乗客がいた場合それとは異なるが、それを補正する方法はないため、ここでは交通ICカードデータから得られた乗降者数をもって評価を行うこととする。前述の通り、交通ICカードの利用率がおよそ70%であることから、ここでの結果は、実際の2/3程度である可能性があることに留意する必要があるだろう。さらに、現金での支払いの場合にはICカードと比較してかなり後者に時間がかかることにも留意する必要があるといえる。また、前述の通り、ICカードの処理の記録は分単位となっているため、乗降時間が0となる可能性もある。

上記のようにデータ整理したうえで、乗降者数に対する乗降時間の割合を図-5に示す。図-5より、1回の最大乗降者数は最大42人に至り、乗降時間の最大は8分と記録された。図をみると、乗降者数が増えるにつれ、1分、2分と乗降時間が長くなる傾向が確認でき、このデータを用いても乗降客数と乗降時間の関係が見いだせようである。また、このデータを用いて、乗降者数ごとに

表-3 バス停間の距離

バス停コード	バス停間距離 (km)	始点からの距離 (km)
17	0	0
16	0.4	0.4
15	0.3	0.7
13	0.25	0.95
12	0.27	1.22
11	0.35	1.57
10	0.35	1.92
8	0.3	2.22
7	0.22	2.44
6	0.3	2.74
5	0.16	2.9
4	0.2	3.1
3	0.2	3.3

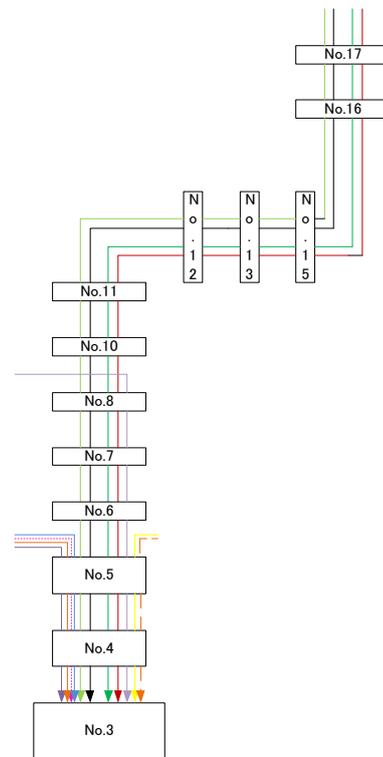


図-4 対象ルート

乗降時間の平均値をとり散布図に示し、それに対する線形近似式を求めてみた（図-6参照）。得られた結果より、乗降者数が多いほど乗降時間がかかるという一般的な関係を見いだすことができた。また、決定係数は91%であるため、2つの要素が深い関係を持つといえる。

(3) バスバンチングに関する考察

本節ではバスサービスの課題の一つの側面である、バスバンチング（団子運転）を評価する。そのために、交通ICカードデータからバスサービスの履歴を再現する。これより、バスの軌跡をもとめ、バス停到着時間からバス車頭時間間隔を算出することが可能である。それを基

づき、バスバンチング現象の評価指標の手法を提案する。

a) データ処理の概要

まず、交通ICカードデータから、バスの運行履歴を作成する方法について説明する。前節の考察と同様に、利用日、路線系統、車号、バス停ごとに乗降時刻の最小値、最大値、および乗降者数を求める。このデータについて、1次元にバス停間距離を設定し、同じ利用日、系統、車号のバスは同一サービスであるため、これらの記録をつなぎ合わせることで、バスの移動軌跡を求めることができる。ただし、バスがルート上の全部バス停に停車するわけではなく、停車したバス停だけで記録されている。そのため、本節では少なくともふたつのバス停で停車したサービスを対象として、通過区間を内挿することとした。なお、ひとつのバス停しか停車した記録がない車号は今回対象外であり、今後の課題として位置づける。補間方法については、次項で述べる。

b) バス停通過データを補間する方法

対象データには、あるバス停から出発し次のバス停に到着するバスは停車するバス停での時刻がそれぞれ記録されているため、バス停間の距離（表-3 参照）がわかれば、平均速度が算出できる。ここでは、記録されている2つのバス停間は、一定速度で走行しているとし、次の式に基づいて、通過したバス停の通過時刻を算定する。

$$v_{i,i+1} = (d_{i+1} - d_i) / (t_{i+1}^a - t_i^l) \quad (1)$$

$$\hat{t}_k^l = \hat{t}_k^a = t_i^l + (d_k - d_i) / v_{i,i+1} \quad (2)$$

- $v_{i,i+1}$: バス停*i*と*i+1*の間の平均速度
- d_i : バス停*i*と*i+1*の間の距離
- t_i^a, t_i^l : それぞれ、バス停*i*において記録された到着時刻と出発時刻
- \hat{t}_k^a, \hat{t}_k^l : バス停*i, i+1*の間に存在するバス停*k*における到着時刻および出発時刻の推定値

上記の方法を用い、前提条件を満たす欠如データの補間を行った。補間後のデータを活用し、次項から車頭時間間隔と待ち時間を計算する。

c) バス運行の定時性評価

上記の処理により得られたデータを活用し、バスの定時性の分析を進めていく。ここでは、車頭時間間隔と平均待ち時間を用いて分析を進める。上記の補間により得られたデータから、車号ごとに各バス停に到着したであろう時刻を推定できることから、各バス停の到着に関する車頭時間間隔（time headway）を計算することができる。なお、平均車頭間隔は、各時間帯において観測された車頭時間の平均値であり、平均車頭間隔の逆数が、1時間あたりの運行便数となる。次に、待ち時間については、乗客がランダムに到着するとした場合に待つである

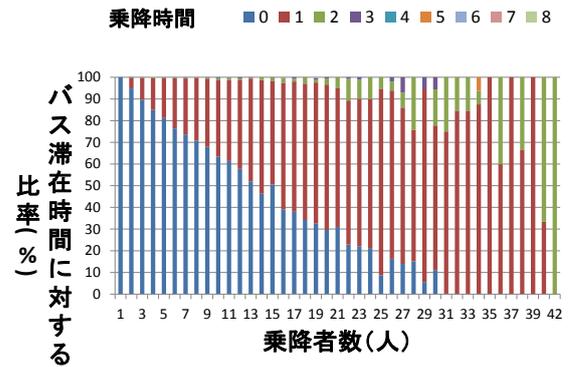


図-5 乗降者数と乗降時間の関係

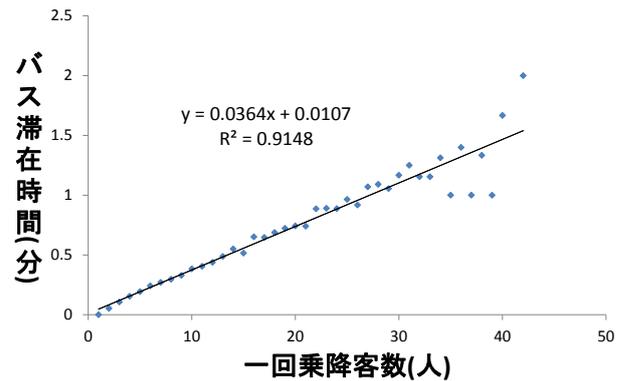


図-6 乗降者数と乗降時間の関係

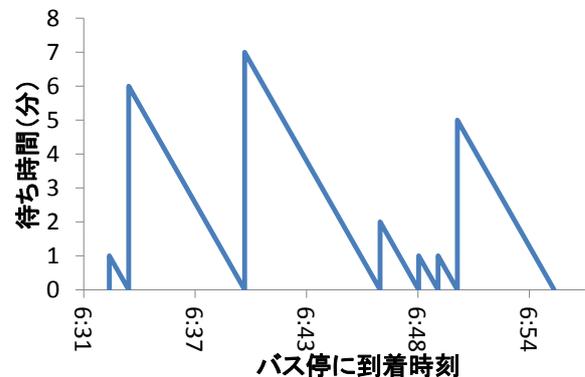


図-7 待ち時間と車頭時間間隔

う時間の期待値と定義し算定する。例として、2011年9月1日の6時台の車頭時間と待ち時間を図-7に示す。図-7では、x軸にバス停に到着時間を、y軸に待ち時間を示した。なお、連続する2台バスの到着時間の差が車頭時間間隔である。このとき、各時刻における待ち時間の値は、図のように直角三角形になり、直前のバスの出発直後に到着し、次のバスが到着するまでの車頭時間を*h*とすると、この乗客は*h*だけ待つことになるため、待ち時間の期待値は、図に示した直角三角形の面積を1時間で除したものとなる。

$$\bar{h}_{it} = \frac{1}{n_{it} - 1} \sum_{j=1}^{n_{it}-1} h_{itj} \quad (3)$$

$$\bar{w}_{it} = \frac{1}{2 \cdot 60} \sum_{j=1}^{n_{it}-1} h_{itj}^2 \quad (4)$$

ここで、

- n_{it} : 時間帯*t*にバス停*i*に到着したバスの総数
- h_{itj} : 時間帯*t*にバス停*i*に到着した*j*番目のバスと*j*+1番目のバスの間の車頭時間
- \bar{h}_{it} : 時間帯*t*にバス停*i*に到着したバスの平均車頭時間
- \bar{w}_{it} : 時間帯*t*にバス停*i*に到着したバスの平均待ち時間

さらに、平均時間間隔と平均待ち時間の比として、サービスの定時性指標を次の式で求め、バスバンチングの現象を評価するための指標として提案する。

$$P_{it} = \bar{w}_{it} / \bar{h}_{it} \quad (5)$$

ここで、 P_{it} の値の意味するところを理解するために、次の2つのケースを検討する。

ケース1 : 車頭時間間隔が一定の場合

4台のバスが一定の車頭時間間隔に到着するとする。この場合、**図-8(a)**に示すとおり、定時性指標 P_{it} は $1/2$ となる。

ケース2 : バスバンチングが発生している場合

ここでは、4台のバスのうち、2台目と3台目が、1台目の到着してから h 後に同時に到着したとする。**図-8(b)**のように、この場合には、定時性指標は $5/6$ となり、等間隔での到着よりも大きくなる。

なお、ここに示した定時性指標は、乗客配分モデルにおいてしばしば設定される定時性パラメータ²⁾に他ならない。理論的には、等間隔でバスが運行される場合、定時性指標は $1/2$ で最小となり、ランダムサービスの場合、すなわちバスの到着分布が指数分布に従う場合には、1をとる。一方で、バスバンチングが生じていると、 P_{it} の値はどんどん大きくなり、1を超えることになるだろう。実際に、バスバンチングが、朝夕のピーク時間帯によく見られる。そのため、提案した定時性指標を用い、時間的にバス停ごとに変動があるかどうか分析する。**図-9**は朝と夕方の時間帯に分類し、ルート上の各バス停での定時性指標を算定した結果を示す。図より、まず、全てのグラフが右肩あがりであることがわかる。つまり、駅近くのバス停ほど定時性指標の値が大きく、バスバンチングが発生しやすくなっていることがわかる。また、朝の時間帯(**図-9(a)**)においては、定時性指標は1を超えることが多い。特に、6時台において、駅直近から3つのバス停で大きな値をとっており、バスの団子運転が多

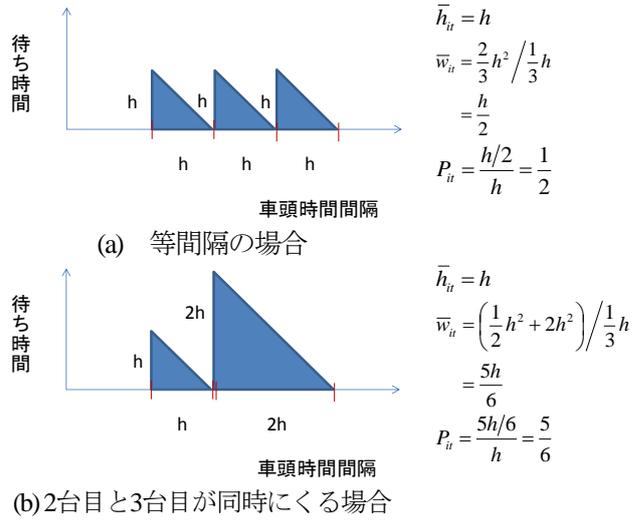


図-8 P値の算定例

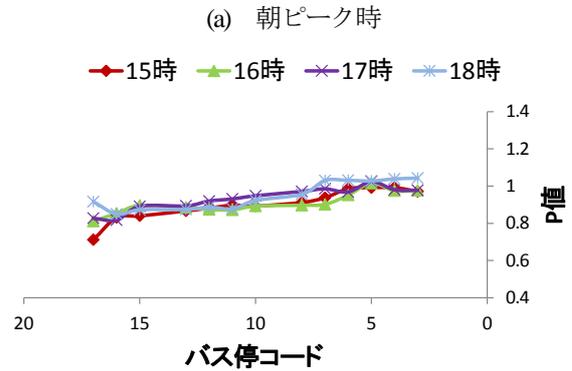
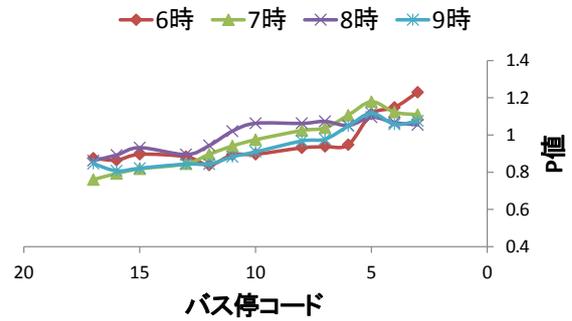


図-9 定時性指標算定結果

く発生している。夕方の時間帯(**図-9(b)**)については、定時性指標の値は大きくても1程度であり、それほど深刻なバンチングは発生していないようである。

d) バスバンチング発生時の車両軌跡の考察

次に、補間後のデータからバス履歴を再現し、バスの走行軌跡と定時性指標との関係を考察する。バスバンチングの状況を理解するために、ある一日の一定の時間帯にバスの軌跡がどのように変動するかについて注目する。ここでは、2011年9月1日の6時台をピックアップした。定時性指標の算定値を**図-10**に、6時台のバスの走行軌跡を**図-11**に示す。バス停の位置については**表-3**を参照してほしい。**図-10**によると、バス停3~5で定時性指標の

値が大きくなっていることがわかる。また、図-11中の赤丸の地点でバスバンチング現象が見られる。表-2より、バス停3～5の位置は、y軸上の2.9～3.3km地点である。図を見ると、その他の地点でもバンチングに近い状況は発生しているが、特に2.9～3.3km地点で顕著であり、定時性指標の値と実際観測される状況が整合することが確認できる。バスバンチングを評価するため、P値は有効といえる。また、図-11より、6時36分ごろ0.5km位置にバスバンチングが起こり、その時点から2台のバスが終始接近して走行している様子がわかる。さらに、3kmの位置でバスバンチングが再発生している。このように、バスの走行軌跡からバスバンチングの特徴を理解可能であると考えられる。

e) バスの定時性の時間推移の考察

最後に、時間帯や曜日による定時性指標の変化を分析する。ここでは、分析対象区間内で、上流（バス停17）、中間点（バス停8）、下流（バス停5、3）の主なバス停をピックアップし分析を進める。図-12に、それぞれの場所での降雨レベルごと、時間帯ごとの定時性指標の値の推移を示す。

図-12より上流バス停であるバス停17では、P値の値は1より低いことが多く、それほど深刻なバスバンチングは発生していないようである。一方で、中流から下流の間のバス停ではバスバンチングが頻繁に発生している。対象区間の特性として、中流から下流のバス停までには、様々なバス系統が合流するため、このような結果が生じていると考えられる。また、中流、下流のバス停において、時間帯が遅くなるにつれて、徐々に定時性指標値が小さくなっていくことも興味深い。

また平日（図-12(a)）より、駅に近いほどバスの定時性が低くなるようであり、午前中（6時から8時まで）にピークにいたる。平日と土・日・祝日の傾向がかなり異なることも特徴的である。土曜（図-12(b)）では、昼間（10時から14時までの間）にP値の値が最も高いとみられる。日曜（図-12(c)）では、P値の値が1より低いことが多く、バスバンチングは激しくないと考えられる。最後に、祝日（図-12(d)）については、バス定時性は比較の変動しているようである。以上のように、バスサービスの変動について、ICカードデータを活用することで検証することが可能である。

5. おわりに

本稿では、バスサービスの評価を交通ICカードデータを活用して行うこととして、その例として所要時間の変動、バス停車時間と乗降客数の関係、そしてバスバンチング現象の3点を分析した。ICカードデータを用いることで、バスバンチング現象の特徴を理解することが可

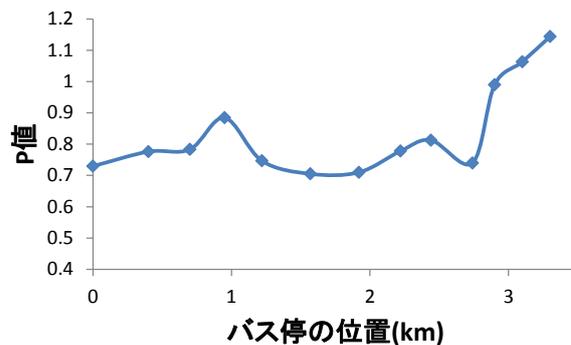


図-10 2011年9月1日（木）の6時台のP値算定結果

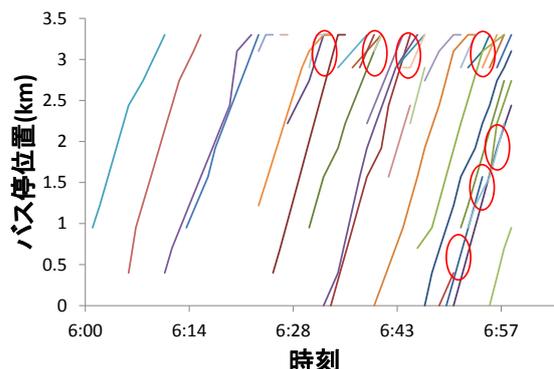


図-11 2011年9月1日（木）の6時台のバス履歴

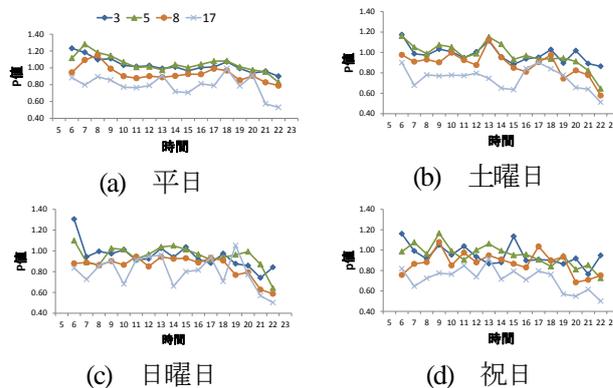


図-12 平休・時間帯ごとのP値の推移

能になったといえる。今後、提案したバスの定時性指標を用い、バスの定時性を決定づける要因についてより詳細に分析し、バスサービスの改善につなげたい。

謝辞：本研究は科学研究費挑戦的萌芽研究、「交通移動における規則性と順応プロセス：交通ICカードを用いた時系列行動解析」（研究代表者：倉内文孝，23656312）として実施した。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) Kurauchi, F., Schmöcker, J.-D. and Shimamoto, H., “Understanding Demand/Supply Variations on Transit Network Using Smartcard Data”, Proceedings of the 5th

- 2) Spiess, H. and Florian, M., "Optimal Strategies : A new assignment model for transit networks", Transport

Using Smartcard Data to Appraise the Bus Service

Tinh Thanh NGYUEN and Fumitaka KURAUCHI

Smartcard system have been introduced among many cities all over the world in recent years. In such system, a unique identification number is assigned to each card and it can track the behavior of passengers over time. If other information such as transit line number, vehicle number and boarding/alighting bus stops are recorded in the system, bus trajectories can be reproduced and thus bus service evaluation can be carried out using the smartcard data.

This paper appraises the bus service by reproducing the bus trajectories from smartcard data. Travel time variation and bus punctuality have been investigated.