

# バス IC カードデータとアンケートデータを 融合した混雑度とそのばらつきの評価

小倉 大輝<sup>1</sup>・井料 隆雅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: 181t105t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

需要の多いバス路線において高頻度運行を行う際に問題となるのが、**Bunching** (バンチング、いわゆる団子運転) と呼ばれる運行間隔の不均質化である。この現象は、定性的には、あるバスが何らかの理由で少量の遅れ時間を受けたとき、それ以降のバス停に乗客が遅れ時間の分だけ増加し、増加した乗客による乗降時間が遅れ時間を拡大してしまうことにより発生すると理解できる。本研究では、IC カードデータから得られる情報を用い、実際の路線でのバンチングの状況の把握を行った。IC カードデータから得られる降車時刻および人数と、アンケートによる OD 交通量調査データを組み合わせることにより、バンチングの発生状況、および、バスの便ごとの断面交通量と運転時隔の相関関係を知ることができた。また、これらの結果を既存理論にあてはめることにより、バンチングを改善するための制御案を提案した。

**Key Words:** *Bunching*, IC カードデータ

## 1. はじめに

需要の多いバス路線において高頻度運行を行う際に問題となるのが、**Bunching** (バンチング、いわゆる団子運転) と呼ばれる運行間隔の不均質化である。この現象は、定性的には、あるバスが何らかの理由で少量の遅れ時間を受けたとき、それ以降のバス停に乗客が遅れ時間の分だけ増加し、増加した乗客による乗降時間が遅れ時間を拡大してしまうことにより発生すると理解できる。この現象については、古いものとしては、路面電車を対象とした、物理学者の寺田寅彦による解析<sup>1)</sup> がよく知られる。一般鉄道においては仮屋崎らによる解析<sup>2)</sup> がある。バンチングを抑制するには、連続する 2 つの便の運行時隔を何らかのルールで制御しなくてはならない。典型的なのは、あらかじめ指定されたバス停の出発時刻に余裕を持たせることにより、運行時隔をいったん時刻表通りにリセットする方法である。一方、Daganzo<sup>3)</sup> は、時刻表を用いずに運行時隔を自律的に調整する方法を提案している。また、提案手法は、時刻表による方法よりも効果的にバンチングを解消できることを示している。この方法を拡張し、時刻表による運行スケジュールの維持も可能とする制御手法が和田ら<sup>4)</sup> により提案されている。これら以外にも、Bartholdi et al.<sup>5)</sup> は自発的に遅延を起こすことでバスサービスを改善する方法を提案している。

実際のバス路線におけるバンチング状況の把握と、そ

の改善策の立案を行う際には、当然ながら実際の運行状況を反映するデータを取得し分析することが必要となる。寺田<sup>1)</sup> は、当時の都電において自身が直接観測したデータを基に考察を展開しており、それだけでも現象の理解には十分な情報が得られているといえる。しかし、現代においては定量的かつ包括的なデータを長期にわたって自動収集することが可能となっている。より精緻な解析や制御方法の提案を行うのであれば、これらのデータの活用を考えることは当然重要であるといえよう。

公共交通において長期にわたって自動収集されるデータのうち、代表的なものは IC 乗車券によるデータである。IC 乗車券によるデータ (以降では IC カードデータと呼ぶ) を活用した研究はすでに多くのものが存在する。例えば、嶋本<sup>6)</sup> らは、英国・ロンドンの 4 週間分のバス IC カードデータを用いて、公共交通の変動の把握を行っている。また、Kusakabe and Asakura<sup>7)</sup> は、IC カードデータと調査データからトリップ目的を推定している。

交通需要の観測という意味では、IC カードデータは必ずしも完全とはいえない。特に均一運賃の路線では起終点交通量が観測されていないことがほとんどである。また、競合する交通手段の利用状況を同時に把握できないことも多い。IC カード以外の支払手段を用いる利用者の需要は全く把握されない。これらのような事情により、IC カードデータはアンケートにより取得

されたデータと比べて、その質において常に優位に立っているわけではないことには注意を要する。

アンケートデータと比べて IC カードデータが正確に取得できる情報としては「時刻に関する情報」がある。少なくとも、IC カードデータにより、運賃が決済された時刻を正確に把握することが可能である。分単位程度の精度で正確な時刻をアンケートにより取得することは、不可能であるか、可能であっても煩雑な手間を要し、現実的とはいえない。この特性を利用した研究として Kusakabe et al.<sup>8)</sup> がある。この研究では、乗降駅の改札口で記録されたカードの通過時刻と時刻表を照合することにより、乗客の列車選択行動（すなわち、普通列車と急行列車のいずれに乗車したか）を判別している。この研究の対象路線の電車の運行時隔は分単位であり、分析には正確な時刻の把握が必須となる。

本研究では、時刻の正確な把握が可能であるという特性を活用し、IC カードデータを用いてバンチング状況の把握を行い、その結果を Daganzo の方法<sup>3)</sup> に適用して、バンチングを解消するための方策を定量的に提案することを目的とする。本研究で対象とした路線においては均一運賃が採用されており、降車時のみ決済する方法が採用されている。IC カードにより観測される降車人数から各便の各バス停間の乗車人数（断面交通量）を推定するために、本研究ではアンケートによる OD 交通量調査を併用する。これらのデータを用いて Daganzo の方法に出てくる各種定数を推定する。論文は 4 章からなる。1 章で研究の背景と目的を説明した。2 章ではデータとその分析手法および制御手法について述べる。3 章で分析結果を示し、それを用いて制御手法を提案する。4 章で考察と今後の課題を述べる。

## 2. データとその分析手法および制御手法

### (1) データの概要

本節では、実際に使用したデータについて説明する。利用データは、対象路線（1 路線の 1 方向）を運営する交通事業者から提供されたものであり、IC カードデータと OD 交通量調査データが含まれる。

対象路線では、バス降車時に運賃を支払う形式になっているが、支払い方法に IC カードでの支払いがあり、そのときに IC カードデータが取得される。IC カードデータに含まれるデータのうち、路線番号、支払い日時、降車場所の情報、バスの固有番号を分析に用いる。バスの固有番号を用いて、バスの便番号（当該バスが対象路線を何度目に走行したか）を算出することにより、各降車がどのバスに乗車していた乗客のものであるかを特定する。データの期間は、2016 年 4 月から 2017

年 3 月までの 1 年間である。本研究ではこの期間のうち平日のみを分析対象日としている。

対象の路線バスでは、定期的に OD 交通量調査をアンケートによって行っている。IC カードデータの期間内にも調査が実施されており、本研究ではこのデータを用いる。このアンケートは車内で実施され、各乗客の乗降バス停と支払い手段、そのバスの便が走行した時間帯が特定できる内容が含まれている。アンケートは車内で即時回収され、回収率は十分高い（100%に近い）とされているため、本研究ではこの値が実際の OD 交通量をそのまま代表していると考えられる。

### (2) 便別の断面交通量の推定

IC カードデータと OD 交通量調査の結果を組み合わせることにより、各対象日の各便の断面交通量を推定する。断面交通量の推定のために、まずは、OD 交通量を推定する。OD 交通量調査の結果を用いて、各時間帯（1 時間単位）に各バス停を降車した乗客がどのバス停から乗車したか、その割合を計算する。この値は、当然ながら OD 交通量調査を実施した日の需要パターンしか代表し得ないが、本研究では、この割合が、分析対象のすべての日において、各バス停を降車した乗客がどのバス停から乗車したかの確率を示すものとして扱う。バス停  $i$  から  $j$  まで時間帯  $t$  の便  $k$  に乗車した乗客数の推定値を示す確率変数  $X_{ijk}^t$  の期待値は、この確率を  $p_{ijk}^t$ 、IC カードデータの観測値から推定したバス停  $j$  での（任意の支払い手段による）降車数を  $n_{jk}$  としたときに、

$$E(X_{ijk}^t) = n_{jk}p_{ijk}^t \quad (1)$$

で示される。式 (1) の値のある区間（例えば、バス停  $i-1$  からバス停  $i$ ）で加えることにより、断面交通量の推計値を算出できる。

断面交通量の推計値はさまざまな理由により真値との間の誤差が発生することが予想されるが、以下では、そのうち乗車バス停の推定による偶然誤差の大きさを見積もることを考える。確率変数  $X_{ijk}^t$  が多項分布に従うとしたとき、その分散と共分散は、それぞれ、

$$\text{var}(X_{ijk}^t) = np_{ijk}^t(1 - p_{ijk}^t) \quad (2)$$

$$\text{cov}(X_{ijk}^t, X_{hjk}^t) = -np_{ijk}^t p_{hjk}^t \quad (3)$$

で計算できる。その和である断面交通量の標準偏差は、乗車バス停の集合を  $M$ 、降車バス停の集合を  $N$  とすると、断面  $m' - n'$  において、

$$\begin{aligned} \text{var}\left(\sum_m \sum_n X_{mnk}^t\right) &= \sum_m \sum_n \text{var}(X_{mnk}^t) \\ &+ \sum_{m_1} \sum_{n_1} \sum_{m_2} \sum_{n_2} \text{cov}(X_{m_1 n_1 k}^t, X_{m_2 n_2 k}^t) \quad (4) \end{aligned}$$

$$m, m_1, m_2 \in M \text{ and } n, n_1, n_2 \in N$$

$$m' \geq m, m_1, m_2 \text{ and } n' \leq n, n_1, n_2 \\ (m_1, n_1) \neq (m_2, n_2)$$

の平方根で計算できる。  $p_{ijk}^t$  の計算において設定する時間帯  $t$  は 1 時間単位で設定する。 IC カードの降車数については降車時間を時間帯ごとに集計し、 IC カード利用率と選択確率  $p_{ijk}^t$  は、起終点調査の便の到着時間で時間帯ごとに集計する。 便ごとの OD 交通量を求める際に使用する選択確率及び IC カード利用率の時間帯は、便ごとに分類した IC カードで、その IC カードを時間帯ごとにソートした中で中央に位置する IC カードデータの時間帯をその便の時間として使用する。

バスの運行時隔の評価には、分析対象路線の終点近くに位置しほとんどの乗客が降車するバス停での IC カードデータによる降車時刻を用いる。 複数人降車した場合は最初の 1 名の時刻を用いる。

### (3) Daganzo によるバンチング制御理論

Daganzo<sup>3)</sup> は、運行時隔を制御点で動的に（時刻表によらずに）コントロールする方法を提案している。 いま、運行時隔  $H$  が一定であり、起点からはこの運行時隔でバスが出発する路線を考える。 以降では  $s$  はバス停を示す（上流側から番号づけられる）が、制御可能なバス停に限られる場合には、便宜的に  $s$  は制御可能なバス停とみなすことができる。 各バス  $n$  が  $s+1$  に到着する時刻  $a_{n,s+1}$  は、式 5 で表される。

$$a_{n,s+1} \approx a_{n,s} + c_s + \beta_s(a_{n,s} - a_{n-1,s} - H) + v_{n,s+1} \quad (5)$$

$\beta_s$ : 無次元パラメータ,  $v_{n,s+1}$ : ランダムノイズ項

$\beta_s$  は運行時隔が長くなれば、それだけ続行便の乗客が増加し、その結果運行時隔がさらに長くなるメカニズムを示す係数である。 式 5 は「遅れが遅れを増幅させる」不安定な構造を持っている。 この式に人為的な遅延  $D_{n,s}$  を加えることでバンチングを緩和する。  $D_{n,s}$  として、例えば、式 6 のようなものが提案されている。

$$D_{n,s} = d_s + (\beta_s - \alpha)(H - a_{n,s} + a_{n-1,s}), \alpha \in (0, 1) \quad (6)$$

$d_s$ : 平衡時平均遅れ時間,  $\alpha$ : 制御感度を表すパラメータ  
均質的な区間において ( $d_s = d$  とする), この人為的な遅延を導入した時の運行時隔の標準偏差及び制御により発生する遅れ時間はそれぞれ式 (7), 式 (8) で表される。

$$\sigma_h \approx 0.95\sigma[\alpha(1-\alpha)]^{-1/2} \quad (7)$$

$$d = 3(\alpha + \beta)\sigma_h \quad (8)$$

ここで  $\sigma$  は区間  $s$  から  $s+1$  のあいだの旅行時間の外的要因による誤差の標準偏差を示す。  $\sigma_h$  が  $H$  より十分小さければ、運行時隔のばらつきは無視できるが、これが近い値になれば、便によってはくっついてしまう、

すなわちバンチングが発生してしまうことになる。 バンチングを回避するには、 $\alpha$  を適切に設定するほかは、 $\sigma$  を小さくするしか方法がない。 一般に  $\sigma$  は区間の距離に比例すると考えられるので、区間を短くする、すなわち制御可能なバス停間の距離を短くすることにより、バンチングを回避できることが期待できる。

## 3. 分析結果

対象路線での運行時間隔の分布を表-1 に示す。 この路線の時刻表上での時隔は概ね 3 分であり、実際、どの時間帯でも 3 分間隔がもっとも多く観測されている。 しかし、5 分~6 分、および 0 分も無視できない程度観測されていることがわかる。 このことより、当該路線ではバンチングがある程度発生していることが見て取れる。

対象路線についての便別断面交通量の推計結果を、午前 7 時付近を例として図 1 に示す。 横軸はバス停間の断面を、縦軸はその断面間でのバス乗車人数を表している。 破線はモデルの推定誤差（式 (4) で計算される）による幅を示す。 凡例は各便においてバス停  $v$  で IC カードデータが観測された最初の時間を表している。 この図から便ごとにより乗車数に差がある傾向が見て取れる。

この方法によって求めた便別交通量と IC カードデータを用いて、あるバス（続行便）とその 1 本前のバス（先行便）のあいだの運行時隔と、バス停  $r$  と  $s$  のあいだの続行便の断面交通量の推定値との関係を図 2 と図 3 に示す。 運行時隔は分単位で観測されているため、断面交通量の値は時隔の分単位での平均値としている。 時間帯ごとにこの関係を示した結果、いずれの時間帯でも、到着間隔 1 分から 9 分程度であれば、乗車人数と運行時隔のあいだに正の相関関係があることがわかる。 0 分ではこの関係が成立しないが、これは、0 分においては 2 つの便の前後関係が正確に把握できない（観測が分単位のため）ことによるものと思われる。 10 分以上については、表 1 からわかるようにそもそもサンプル数が少なく、この時間帯については誤差が相対的に大きくなっていると考えられる。

これまでの結果を用いて、Daganzo のバンチング制御を当該路線に適用することを考える。 対象の路線の運行時隔は  $H = 3(\text{min})$  程度で、起点からバス停  $s$  までの所要時間は 30 分程度である。 この区間の旅行時間の標準偏差としては、概略の値であるが、旅行時間の 1 割である 3 分を採用する。（1 割という数字は、当該路線での IC カードデータによる旅行時間の観測を用いて得ているが、この詳細については省略する）。 一部区間の旅行時間の分散については、全体の旅行時間の分散にその区間の全体に占める割合をかけることにより

表-1 時間帯ごとの運行時隔. 数字は時間帯ごとの割合

		先行のバスとの到着間隔 (分)															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
時間帯	7	0.20	0.06	0.12	0.34	0.02	0.09	0.13	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8	0.25	0.11	0.16	0.31	0.04	0.07	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.19	0.06	0.12	0.35	0.03	0.11	0.12	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.18	0.06	0.12	0.35	0.03	0.12	0.12	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11	0.19	0.06	0.10	0.30	0.02	0.13	0.14	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12	0.15	0.04	0.09	0.28	0.02	0.13	0.19	0.01	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	13	0.17	0.05	0.08	0.27	0.02	0.15	0.19	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	14	0.18	0.05	0.08	0.27	0.02	0.13	0.17	0.01	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	15	0.15	0.05	0.09	0.29	0.03	0.14	0.17	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16	0.18	0.05	0.12	0.35	0.03	0.11	0.12	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	17	0.16	0.07	0.11	0.28	0.05	0.12	0.14	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.18	0.07	0.12	0.31	0.05	0.14	0.12	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

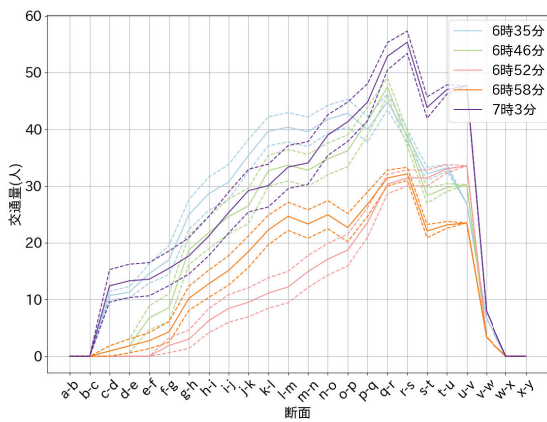


図-1 便別の断面交通量の推計結果

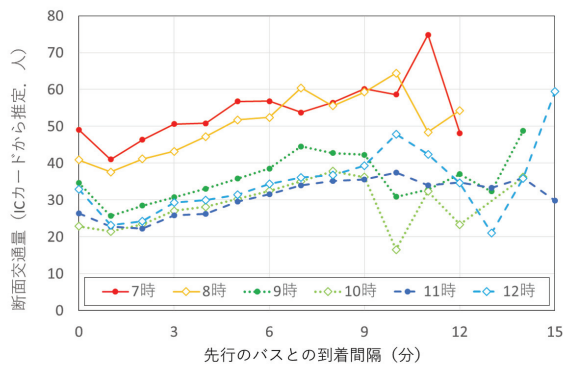


図-2 到着間隔と乗車数の関係 (バス停 r と s 間, 午前)

得られるとする. 図 2 を見ると, 先行バスとの間隔が 1 分増えるごとに, 時間帯にもよるが概ね 2~3 人だけ乗車人数が増えていることが分かる. 1 人乗車するときの時間が 3~6 秒 (0.05~0.1 分) 程度とすれば,  $\beta$  の値は 0.1 ~ 0.3 程度の値となると推測できる. なお, この値は, Daganzo<sup>3)</sup> が数値計算例で用いた値とほぼ同じである. 制御パラメータである  $\alpha$  には 0.2 を用いる.

複数の制御点の設定を用いて計算した結果を表 2 に

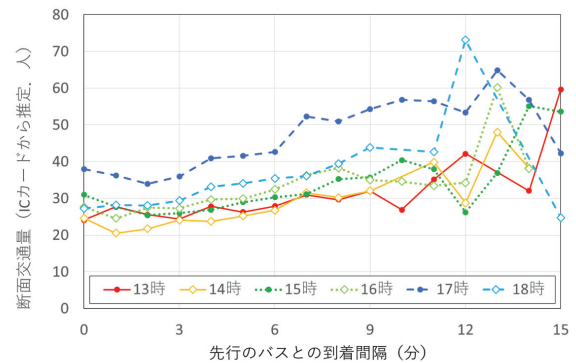


図-3 到着間隔と乗車数の関係 (バス停 r と s 間, 午後)

表-2 制御点の数による制御結果

制御点の数	1	4	8
$\sigma_h$ (分)	5.0	3.1	2.4
遅れ ( $\beta = 0.1$ )(分)	4.5	11	17
遅れ ( $\beta = 0.3$ )(分)	7.5	19	29

示す. 例えば制御点を 1 個とした場合は  $\sigma = \sqrt{9/2} = 2.1$ (分) である. 4 個とした場合は  $\sigma = \sqrt{9/5} = 1.3$ (分) である. 8 個とした場合は  $\sigma = \sqrt{9/9} = 1$ (分) である. 表 2 に結果を示す. バンチングを確実に起こさないようにするには制御点の数を 8 個にする必要があると見られるが, 追加の遅れ時間の値は 17~29 分程度となる. これは 30 分の所要時間に対してサービスレベルの低下が大きい. 結果として, バンチングの回避と所要時間の維持にはトレードオフが大きいことがわかる.

#### 4. おわりに

本研究では, バスの IC カードデータおよびアンケートによる OD 交通量調査のデータを用いて, バスのバンチングの現状を把握すること, また, その現状に対して Daganzo により提案されたバスのバンチング制御方法の適用方法の提案を行った. IC カードデータを用

いた運行時隔の把握のほか、OD 交通量調査データを組み合わせることによる便ごとの断面交通量の推計方法を提案し、推計を行った。分析対象とした路線においては、制御点を多数（試算では 8 個）置くことによりバンチングの回避が見込まれるものの、所要時間の伸びが大きく、バンチングの解消とのトレードオフになることもわかった。

本研究では IC カードデータにより運行時隔が測定できること、また、降車時のデータしか含まれていない IC カードデータに、OD 交通量調査のデータを組み合わせることにより OD 交通量や断面交通量が推計できることを示した。前者については、実際に、運行時隔のばらつきが発生している様子を観測することができた。一方で、後者については、多様なものがありうる誤差の原因のうち、乗車バス停の選択に関わる確率モデルの偶然誤差しか見積もっておらず、推定値の信頼性にはまだ課題が残る。特に提案手法では季節変動による系統誤差を見積もることが原理的に不可能である。この問題を解決するには乗車数や断面交通量に関するデータが別途継続的に観測されている必要があり、方法論の改善だけでは対応はできないことにも注意したい。

バンチングの制御については、本研究では Daganzo<sup>3)</sup>の提案した方法の中でもっともシンプルなものを用いており、より高度なものを用いれば、より少ない追加の遅れ時間での安定化が実現する可能性もあろう。ただし、実装に際しては、オンラインでの運行管理が必要となり、どうしても運用にかかわる費用による制約が発生することもある。また、観測から指令までの遅れ時間が発生することも考慮しなくてはならない。昨今はバスロケーションシステムが普及しており、そのような実装との連携を前提とすれば、より現実的な制御手法を考案することができる可能性もあると考える。

**謝辞:** 本研究のうちバンチング制御の理論部分については科学研究費補助金（基盤 A：ポスト・ビッグデータ時代に向けた次世代交通システムの動学的マネジメント手法の構築）の一部としてなされた。データに関わる部分については、交通事業者の協力を受けてなされた。この場を借りて感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 寺田寅彦: 電車の混雑について, 寺田寅彦随筆集第二巻(小宮豊隆編), 1947.
- 2) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, pp.871-879, 2010.
- 3) Daganzo, C. F.: A headway-based approach to eliminate bus bunching: systematic analysis comparisons, *Transportation Research Part B*, pp. 913-921, 2009.
- 4) 和田健太郎, 吉相俊, 赤松隆, 大澤実: 高密度鉄道ダイヤにおける列車集群化を抑制する運行制御方策, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.68, No.5, pp.L1025-L1034, 2012.
- 5) John J. Bartholdi III, D. D. E.: A self-coordinating bus route to resist bus bunching, *Transportation Research Part B*, pp. 481-491, 2012.
- 6) 嶋本寛, 北脇徹, 宇野伸宏, 中村俊之: IC カード利用履歴データを用いた公共交通需要変動分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, 2014.
- 7) Takahiko Kusakabe, Y. A.: Behavioural data mining of transit smart card data: A data fusion approach, *Transportation Research Part C*, pp. 179-191, 2014.
- 8) Takahiko Kusakabe, Takamasa Iryo, Y. A.: Estimation method for railway passenger' train behavior with smart card transaction data, *Transportation*, pp. 731-749, 2010.

(2018. 4. 27 受付)

## EVALUATION OF CONGESTION AND ITS VARIATION BY COMBINING BUS SMART CARD DATA AND SURVEY DATA

Taiki OGURA and Takamasa IRYO