

# プローブカーデータを用いた信号交差点の パラメータ推定

福島 一矢<sup>1</sup>・安田 昌平<sup>2</sup>・井料 隆雅<sup>3</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: 182t130t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</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: yasuda@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

近年では路車間通信技術の高度化に伴い、従来の定点系でのデータからは得ることができなかった車両の位置や速度などの走行履歴を、高精度かつ大量に入手可能になったために、プローブ情報の効果的な利用が期待されている。特に一般道路では、信号や合流の影響により、高速道路に比べて交通状態が複雑であることに加え、高速道路に比べ車両感知器など従来の観測データも乏しいため、プローブカーデータから交通状態を推定することの意義は大きい。そこで本研究では、ETC2.0プローブカーデータを用いて、3か所の信号交差点を対象に、一般道交通パラメータの推定をおこなった。その結果、ETC2.0プローブカーデータから、サイクル長、スプリットを高い精度で推定できた。また、飽和交通流率、サイクル当たり待ち行列長の推定にも、適応可能性が示された。

**Key Words :** *probe vehicle data, signalized intersections, parameter estimation*

## 1. はじめに

近年では路車間通信技術の高度化に伴い、従来の定点系（感知器など）でのデータから得ることができなかった車両の位置や速度などの走行履歴を、高精度かつ大量に入手可能になったために、プローブ情報の効果的な利用が期待されている。日本においてもETC2.0プローブデータの普及が進んできており、これを用いた研究<sup>1)</sup>が増えている。

一般道路では、信号や合流の影響により、高速道路に比べて交通状態が複雑であるため、その推定は現在も大きな研究課題となっている。一般道路の交通状態を精度よく推定することは、道路・交通計画や交通流シミュレーションのインプットの設定において非常に重要である。

Fayazi ら<sup>2)</sup>は、直感的な交通流理論をバスプローブデータに用いて、赤信号により停車したバスの車両軌跡を再構築する方法を提案し、信号パラメータの推定を行った。Fayaziらの手法は、特定の位置を定められた時刻に走行するという特徴を持つバスプローブデータを使用しているが、ETC2.0プローブデータのような一般車両データへの適用例がない。ETC2.0プローブデータは、普及率が低く、データの取得もおおよそ200 mごとで

あるため、車両感知器など従来の観測データに比べ時空間的にスパースなデータであるといえる。そのため、高速道路のように比較的観測の多いエリアと比べると、一般道路の交通状態の推定は難しくなる。しかし、Fayaziらが分析に用いたバスプローブデータも、取得間隔は約200 mとスパースであったが、信号パラメータを高い精度で推定できていたため、Fayaziらの手法はETC2.0プローブデータにも適用可能であることが考えられる。

本研究では、Fayaziらが提案した、サイクル長およびスプリットの推定手法をETC2.0プローブデータに適用可能であるか検討する。また、Fayaziらが提案した車両軌跡を再構築する手法をベースとして、信号交差点における飽和交通流率とサイクル当たり平均待ち行列の推定手法を提案する。

本稿の構成は以下のとおりである。本章では、研究目的について述べた。2章では、使用したデータと推定手法について述べる。3章では、現地調査について述べる。4章では、推定結果について述べる。最後に5章で結論を述べる。

## 2. データと推定手法

### (1) データ

本研究では、Digital Road Map (DRM)にマップマッチング処理を行ったETC2.0プローブデータを使用した。マップマッチング処理後のデータの中から、対象の区間を通過したトリップを抽出して使用した。対象区間は、2次メッシュ523502に存在する国道43号の瀬戸交差点西行き、国道2号の住吉交差点西行き、住吉東町5交差点東行きにおける3つの交差点であり、その区間を図-1に赤い枠線で示す。北側にあるのが国道2号で、住吉交差点と住吉東町5交差点は隣接しているため、1つの枠線で示されている。使用したデータの期間は、2018年4月1日から2018年6月30日までの3か月間であり、8時から18時までのデータを対象とした。地震発生日である2018年6月18日は対象期間から除外した。



図-1 分析対象の交差点

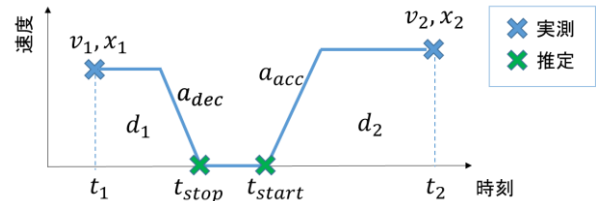


図-2 想定される車両軌跡

### (2) 車両軌跡の再構築

スパースデータから車両軌跡を再構築する方法について述べる。具体的には、Fayazi らが提案した以下の a) ~ c) の手順で、車両が交差点で停止したかどうか、停止した時間、交差点を出発した時間を推定する

#### a) 交差点前後にデータが取得された車両を抽出する

対象交差点前後のリンクの両方で、少なくとも1回以上プローブデータが記録された車両を抽出する。ここで、渋滞が発生している場合、車両の遅れ時間はサイクル長やスプリットといった信号パラメータ以外の影響を大きく受けるため、信号パラメータを精度よく推定できなくなると考えられる。そこで時速5 km以下の速度が記録された車両は分析の対象外とした。

#### b) 車両が交差点で停止したかどうかを決定する

車両が交差点で赤信号によって停止したかどうか判断するために、式(1)によって交差点遅れ時間 $t_d$ を近似する。

$$t_d = (t_2 - t_1) - \frac{x_2 - x_1}{(v_2 - v_1)/2} \quad (1)$$

ここで、 $x_1, v_1, t_1$  はそれぞれ交差点上流のデータ取得時における車両の位置、速度、時刻であり、 $x_2, v_2, t_2$  はそれぞれ交差点下流のデータ取得時における車両の位置、速度、時刻である。右辺第一項 $t_2 - t_1$  は実旅行時間を表し、右辺第二項 $\frac{x_2 - x_1}{(v_2 - v_1)/2}$  は車両の速度が $v_1$  から $v_2$  に線形に変化したと仮定した際の旅行時間を表している。よって、 $t_d \leq 0$  のとき、車両は交差点遅れを経験することなく、青現示時に交差点を通過したと考えられる。 $t_d > 0$  のとき、車両は赤現示によって停止した可能性があるとして、次の手順でさらに詳しく車両の停止の有無を推定する。

### c) 想定される車両軌跡とデータを照合する

$t_d > 0$  のとき、図-2に示される車両軌跡とプローブデータの整合性を確認する。図-2に示される車両軌跡は、交差点上流から一定の速度 $v_1$ で走行する車両が、赤現示によって一定の減速度 $a_{dec}$ で減速し完全に停止した後、青現示によって一定の加速度 $a_{acc}$ で一定の速度 $v_2$ まで加速するという、交差点付近での車両軌跡を近似的に示したものである。信号の位置 $x_{signal}$ が既知のとき、 $d_1 = x_{signal} - x_1$ と $d_2 = x_{signal} - x_2$ は、図-2において、時刻-速度曲線の下面積で表される。これらを踏まえて、車両が赤信号により停止した時刻 $t_{stop}$ と、青現示に切り替わり、車両が発進した時刻 $t_{start}$ は式(2)、式(3)で表される。

$$t_{start} = t_2 - \frac{d_2}{v_2} - \frac{v_2}{2a_{acc}} \quad (2)$$

$$t_{stop} = t_1 + \frac{d_1}{v_1} + \frac{v_1}{2a_{dec}} \quad (3)$$

$t_{stop} > t_{start}$  のとき、プローブデータは図-2で仮定した車両軌跡と整合性がとれないため、これに該当するデータは除外する。 $t_{stop} \leq t_{start}$  のとき、プローブデータは仮定した車両軌跡と整合性がとれていると判断し、これに該当するデータを用いて(3)~(6)の推定を行う。これより先、信号交差点で停止したと推定された車両のことを「推定対象車両」と呼ぶこととする。

### (3) スプリット (赤現示時間) の推定

(2)の車両軌跡の再構築によって、式(2)、式(3)を用いることで、推定対象車両それぞれについて、停止時刻

と発進時刻が推定された。Fayazi らはこれらを用いて、経験赤時間 $t_{red}$ を式(4)で表した。

$$t_{red} = t_{start} - t_{stop} + \frac{v_1}{a_{dec}} \quad (4)$$

ここで、 $v_1/a_{dec}$  は運転手が赤現示を認識してから車両が完全に停止するまでにかかる時間である。この経験赤時間をすべての車両において求め、パーセンタイル値を用いてスプリットを推定する。

#### (4) サイクル長の推定

Fayazi らは、定周期制御の信号機では、青現示の開始時刻間隔はサイクル長の整数倍になるという性質を利用してサイクル長を推定した。図-3 に示すように、時間的に連続した2台の推定対象車両を考える。ここで、この2台の推定対象車両の青現示開始時刻の差を  $b_g(j) = t_{start}(j+1) - t_{start}(j)$  と表すと、サイクル長  $C$  が与えられたとき、 $b_g$  を  $C$  で割ったときの余剰は式(5)で表される。

$$mod_C(b_g) = b_g - round(b_g/C)C \quad (5)$$

ここで、 $round$  は計算結果を最も近い整数にして返す関数である。従って、例えば  $mod_{10}(12) = 2$ 、 $mod_{10}(8) = -2$  となる。これらを用いて、サイクル長の推定値  $\bar{C}$  は式(6)の最適化問題を解くことで得られる。

$$\bar{C} = arg \min_C \sum_{j=1}^n \left( \frac{mod_C(b_g(j))}{C/2} \right)^2 \quad (6)$$

#### (5) 飽和交通流率の推定

Fayazi らが提案した車両軌跡を再構築する手法をベースとして、手順 a), b) によって、飽和交通流率を推定する手法を開発した。

##### a) 推定対象車両の平均経験待ち行列長と発進側の平均加速度の推定

図-4 は横軸に基準点（ここでは上流リンク流入部）からの距離  $d$ 、縦軸に速度  $v$  をとり、推定対象車両の距離-速度関係をプロットしたものである。これを見ると、交差点のある470 m付近を境に、左右で車両の減速と加速を確認できる。右の発進側のプロット群に対して、最小二乗法を用いて、式(7)で表される加速度曲線をフィッティングすることで平均待ち行列長  $q_{mean}$  と平均加速度  $a_{mean}$  を推定する。

$$v = \sqrt{2a_{mean}(x_{signal} + q_{mean})} \quad (7)$$

##### b) 車両位置と経過時間の関係を記述する

青現示になってから、交差点に流入するまでの経過時間  $E_{time}$  を式(8)で表す。

$$E_{time} = \sqrt{\frac{2d}{a_{mean}}} + \frac{d}{h} \times T \quad (8)$$

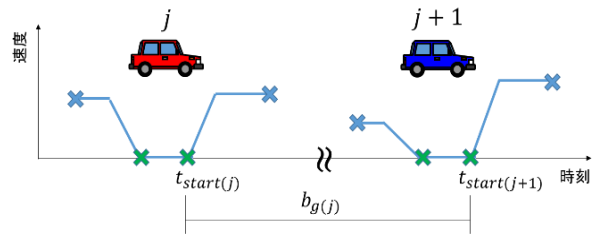


図-3 連続する推定対象車両

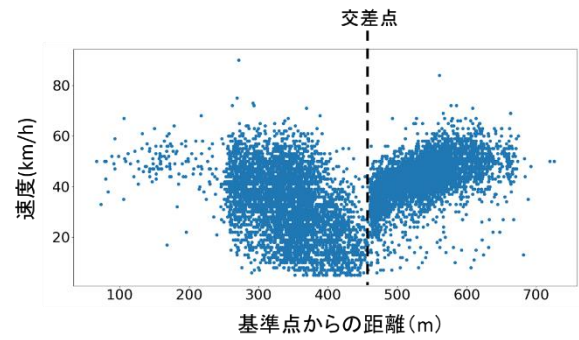


図-4 距離 - 速度関係

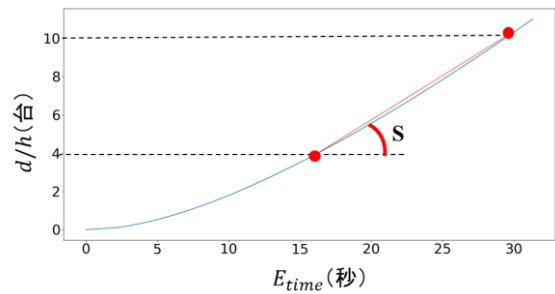


図-5 車両順位 - 経過時間関係

ここで、 $d$  は交差点流入部までの距離、 $h$  は車頭距離、 $T$  は発進遅れ時間である。 $d/h$  は待ち行列の中で、ある車両が先頭から何台目にいるかを近似的に表すものであり、ここでは車両順位と呼ぶこととする。右辺第一項  $\sqrt{2d/a_{mean}}$  は、発進から交差点流入までの経過時間である。右辺第二項  $d/h \times T$  は、青現示になってから発進するまでの経過時間を表している。 $d/h = 3$  までは発進遅れの影響があるものとして、図-5 に示すように、グラフ上における  $d/h = 4$  の点と、 $d/h = 10$  の点を線形に結んだ時の傾き  $S$  を飽和交通流率の推定値とする。

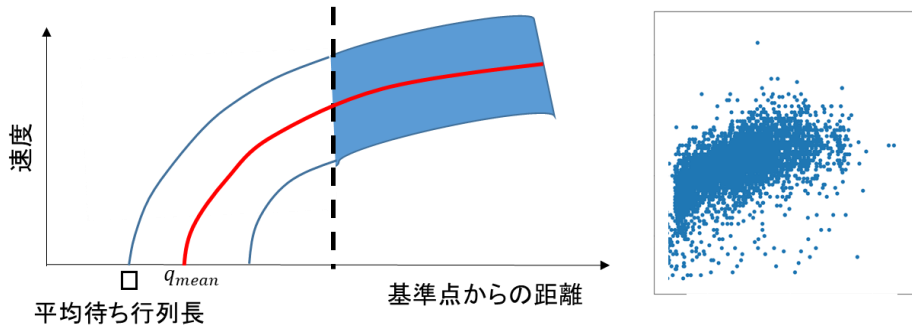


図-6 発進側の車両軌跡

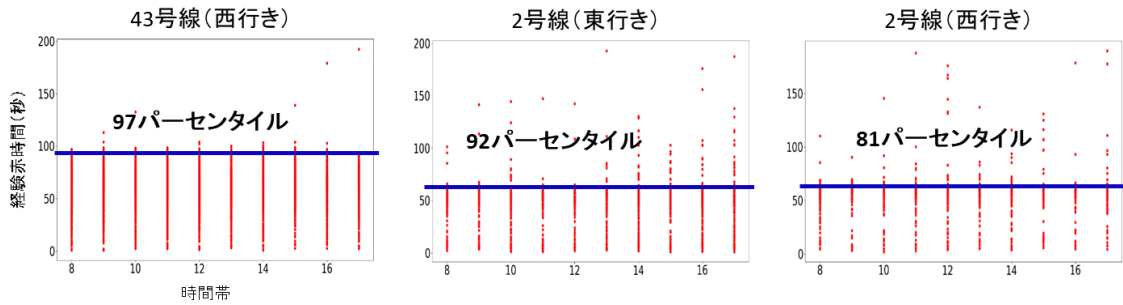


図-7 時間帯別経験赤時間分布

### (6) 1サイクル当たりの平均待ち行列長の推定

1サイクル当たりの平均待ち行列長の推定手法を開発した。この推定手法では、交差点付近において以下の2つを仮定する。

- ・各サイクルの待ち行列において、ある車両がプローブカーである確率は一様に分布する。
- ・すべての車両について、車両順位に関わらず、発進後の加速度が一定である。

2つの仮定より、5節a項で発進側のプロット群にフィッティングした加速度曲線を、曲線より下の領域にデータの95%が入るまで左側にシフトさせることで、図6で示す1サイクル当たりの平均待ち行列長を推定する。

## 3. 現地調査

2018年8月6日に、2章1節において分析対象とした交差点で、下記の時間帯にそれぞれ3サイクルの間、交通状況を観測した。

- ・国道43号(西行き) : 14時台, 17時台
- ・国道2号(西行き) : 13時台, 17時台
- ・国道2号(東行き) : 14時台, 16時台

サイクル長、スプリットについては、直接観測可能であり、各サイクルで得られた観測値の平均値を実測値とした。以下では飽和交通流率と1サイクル当たりの平均待ち行列長について、実測値の設定方法を述べる。

### (1) 飽和交通流率

「改訂 交通信号の手引き」<sup>3)</sup>を参考に、以下の定義に従って設定した。

- ・青現示に切り替わってから、通過車両が途切れるまでの台数を計測し、その最後の車両の先頭部が停止線を通過するまでの時間より3秒短い値でこの台数を割る。時間を短くする理由は発進損失の影響を考慮するためである。

- ・実測値の安定性を確保するため、通過台数が3台以下の場合と、先詰まりが発生していた場合は計測対象外とする。

### (2) 1サイクル当たりの平均待ち行列

初めに、大型車混入率 $\lambda$ を算出する。次に、大型車の車頭間隔を14 m、それ以外の車両の車頭間隔を8 mとし、平均車頭間隔 $h_{mean}$ を式(9)で算出する。

$$h_{mean} = 14 \times \lambda + 8 \times (1 - \lambda) \quad (9)$$

ここで、平均待ち行列台数を $N_{mean}$ とすると、1サイクル当たりの平均待ち行列は $N_{mean} \times h_{mean}$ で求められる。

## 4. 推定結果

### (1) スプリット

図-7は推定された経験赤時間を各交差点について時間帯別にプロットしたものである。図-7中の水平線は実測値を示しており、国道43号(西行き)、国道2号(東行き)、国道2号(西行き)のそれぞれについて、

97, 92, 81パーセンタイル値で推定値と実測値が一致した。

(2) サイクル長

推定結果を表-1に示す。表-1より、すべての交差点において推定値と実測値が一致する結果となった。次に、推定対象車両数と次のデータが得られるまでの時間間隔が推定結果に与える影響を調べるために、a), b)の方法でサイクル長を推定した。

a) 推定対象車両数の変化

推定対象車両からランダムにサンプリングしたデータを用いて推定した結果を図-8に示す。横軸はサンプル数、縦軸はそのサンプル数で10回サイクル長を推定した時の平均値である。図-8より、すべてのリンクで、観測数を増加させると推定値が実測値に近づいていくが、2号線の交差点では推定結果が安定していないことが分かる。

b) データ取得時間間隔の変化

推定対象車両から、数サイクル間隔にデータを抽出して、推定した結果を図-9に示す。横軸はサンプリングされたデータの平均時刻差をサイクル数で換算した値である。図-9より、国道2号の交差点は、データ数の増加で推定値が安定しなかったが、平均しておよそ40サイクル以内にデータがとられれば、安定して実測値を推定できている。

(3) 飽和交通流率

表-1より、誤差5%以内で推定できている。国道2号と比較して国道43号の方が、飽和交通流率が小さいという結果も一致している。

(4) 1サイクル当たりの平均待ち行列

表-1より、国道43号における推定値の精度は高かったが、国道2号での推定値は精度が低かった。

表-1 推定結果

交差点	推定 サイクル長	実測 サイクル長	推定飽和交通流率 (台/青1分)	実測飽和交通流率 (台/青1分)	推定平均 待ち行列長	実測平均 待ち行列長	データ数
国道43号 (西行き)	180s	180s	28.0	27.6	148m	142m(30.44)	4699
国道2号 (東行き)	160s	160s	30.5	29.4	87m	49.2m(17.7)	1577
国道2号 (西行き)	160s	160s	28.6	29.7	160m	84.4m(55.5)	1036

実測平均待ち行列長の括弧内は標準偏差を表す

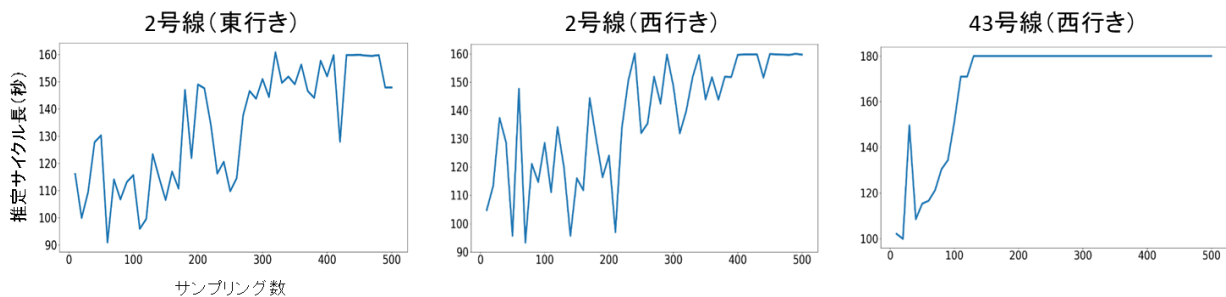


図-8 サンプリング数と推定サイクル長の関係

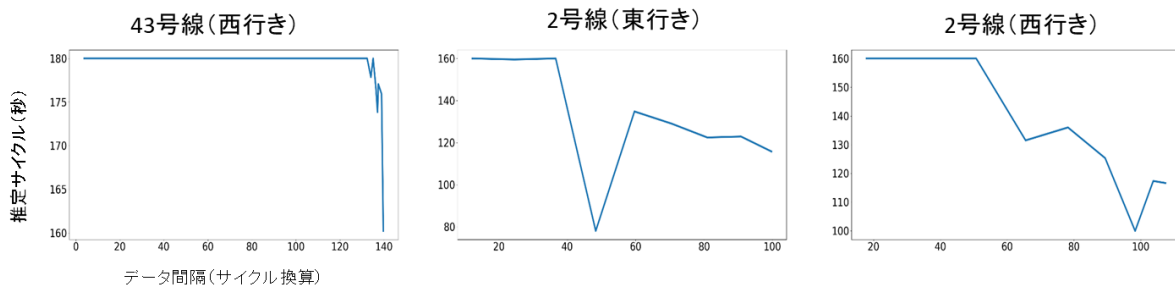


図-9 データ取得間隔と推定サイクル長の関係

## 5. まとめと今後の課題

ETC2.0 プローブデータを用いて、スプリット、サイクル長、飽和交通流率、1サイクル当たりの平均待ち行列を推定した。スプリットについては、経験赤時間の乱れが比較的多かった国道2号（西行き）を除き、95パーセンタイル値程度で、精度よく推定できることを示した。乱れが多かった理由としては、渋滞や先詰まりなどの影響が排除できていない可能性があるため、更なる分析が必要である。サイクル長については、すべての交差点において誤差なく推定できているため、ETC2.0プロブデータにおいても、Fayazi らが提案したサイクル長の推定手法が適応可能であることが示された。観測数と観測間隔がサイクル長の推定結果に与える影響を調べたところ、観測数を増加させるよりも、およそ40サイクル間隔以内にデータを取得することで、安定して真値を推定できることが示された。

飽和交通流率については、推定の精度は良好であったが、目視による観測であったことや、先詰まりが何度か発生したため、サンプル数が少なかったことなど、観測の精度が不十分であったため、今後より詳しい調査が必要である。国道2号と比較して国道43号の方が、飽和交通流率が小さいという結果が、推定と実測の両方で得られた。これは、国道43号は国道2号と比較して、大型車混入率が高いためであると考えられる。

1サイクル当たりの平均待ち行列については、国道43号における推定値の精度は高かったが、国道2号での推

定値は非常に精度が低かった。これは、国道2号線では分析対象とした時間帯での交通量の変化が大きいためであると考えられる。実測値を見ても、国道43号と比較して、国道2号のほうが実測値に対して分散が大きい傾向がみられた。今後は、推定の精度を向上させるために、曜日や時間帯ごとの交通量の変化に着目した分析が必要となる。

**謝辞**：本研究は国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」における研究「蓄積車両軌跡データの効率的活用のための階層型データベースの構築」および「ETC2.0データの活用と評価を通じた次世代ETCの基本設計提案」（代表：井料隆雅）の一部として実施したものである

### 参考文献

- 1) Yasuda, S., Iryo, T., Koyama, Y., and Sakai, K., Characteristics of ETC2.0 probe data compared to road traffic census data, ISTS and IWTDSCS 2018, Matsuyama, Japan, 2018
- 2) S. Alireza Fayazi, Traffic Signal Phase and Timing Estimation from Low-Frequency Transit Bus Data, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015
- 3) 社団法人 交通工学研究会, 改訂 交通信号の手引き, 丸善株式会社, 2006

(2019.10.4 受付)

## PARAMETER ESTIMATION FOR SIGNALIZED INTERSECTIONS USING PROBE VEHICLE DATA

Kazuya FUKUSHIMA, Shohei YASUDA and Takamasa IRYO