

# プローブ車両軌跡データのみを用いた 信号交差点における交通量推定

小林 桂子<sup>1</sup>・和田 健太郎<sup>2</sup>・桑原 雅夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 非会員 東北大学大学院 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)

E-mail:k-kobayashi@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 東北大学大学院特任助教 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)

E-mail:wadaken@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 東北大学大学院教授 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)

E-mail:kuwahara @plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では信号交差点における衝撃波を用いて一般道で観測された 1 台のプローブデータからその車両が通過する前の交通量を推定することを目的とした。Time-space diagram 上でプローブデータを用いて赤現示から停止波と発進波を引くことで交通量を推定する手法を提案し、提案手法の検証を行った。その結果、従来考えられてこなかったプローブ車両から交通量を推定することができる可能性が示された。

**Key Words :** Probe vehicle trajectory, Shock wave, Traffic volume estimation, Signalized intersection

## 1. 研究背景と目的

交通状態を観測する手段として、従来使われてきた車両感知器に加えて、近年では車両 1 台の位置情報を細かく収集することのできるプローブ車両もある。そこで近年ではプローブデータを利用した研究が盛んに行われているが、車両感知器データと併せることなく、現在得られるプローブデータのみを用いて交通量を推定した研究はほとんどない。プローブデータを用いて対象区間の全車両の軌跡を推定した Mehran ら<sup>1)</sup>の研究でも、プローブデータだけでなく車両感知器データも用いている。しかし、車両感知器が設置されていない場所における交通量も分かることは適切な交通政策を考える上でも必要のあることである。瀬尾ら<sup>2)</sup>はプローブ車両のみで交通量を推定することを試みているが、プローブ車両から得られる位置情報に加えて、車載機器により車間距離を測定することで得られたデータも用いる状況を想定した研究となっている。

本研究では、1 台のプローブデータのみから信号交差点を含む一般道における交通量を推定することを目的とする。そして実際のプローブデータを用いて推定手法の検証を行う。

## 2. 信号交差点における衝撃波

衝撃波の速度 $c$ は式(1)で表される。

$$c = \frac{q_i - q_j}{k_i - k_j} \quad (1)$$

$q_i$ 及び $q_j$ はそれぞれ異なる状態 $i$ 及び状態 $j$ における交通量、 $k_i$ 及び $k_j$ はそれぞれ異なる状態 $i$ 及び $j$ における交通密度である。式(1)より衝撃波の速度は Fundamental Diagram 上で状態の異なる 2 点( $q_i, k_i$ )及び点( $q_j, k_j$ )を結んだ傾きと一致することを表している。衝撃波は交通量や密度が異なる領域の境界の線である。よって、信号交差点においては図-1 のように、走行していた車両が赤現示のために停止した時、及び赤現示で停止していた車両が青現示になったために発進した時に衝撃波は発生する。前者を停止波、後者を発進波と呼ぶ。発進波は、飽和交通密度状態で停止していた車両が、青現示になったために飽和交通流率で発進し始める境界線であるため、その速度は三角形の Fundamental Diagram を仮定すると backward wave speed と一致する。一方停止波は、ある交通流率及び交通密度で走行していた車両が、飽和交通密度で停止することによって作られた境界線であるため、その速度を Fundamental Diagram に当てはめると、走行状態時の交通量が分かる。

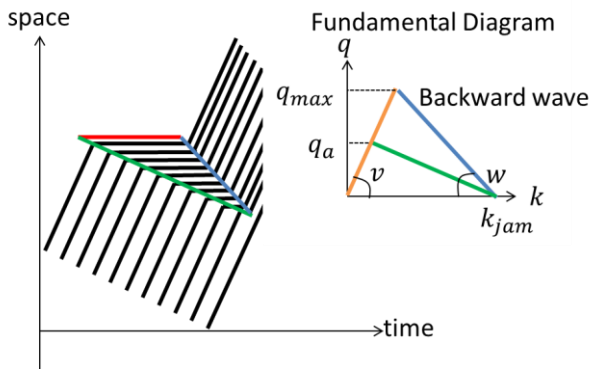


図-1 信号交差点における衝撃波

本研究では、信号交差点で発生する停止波と発進波の2つの衝撃波を利用して交通量を求める手法を提案した。

### 3. プローブ軌跡の周りの交通量推定手法

これから述べる推定は、プローブデータをtime-space diagram上に軌跡として描いた図上で考える。推定における仮定は以下のようにする。

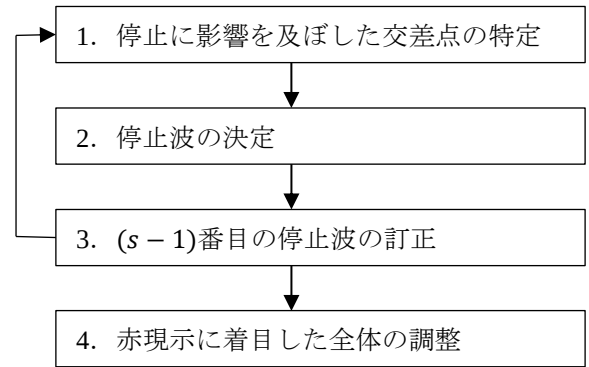
- Fundamental Diagram は三角形とする
- 信号交差点以外のボトルネックはないとする
- 流入・流出車両の存在は考慮しない
- 信号交差点の位置及び赤現示の長さは既知
- First In First Out が成り立つ

上の述べた「流入・流出車両の存在は考慮しない」という仮定について、交差道路からの流入車両と流出車両の台数がほぼ同じであれば、特に流入・流出車両を考慮しなくても推定した交通量の合計に影響はないと考えられる。また、「信号交差点の位置及び赤現示の長さは既知とする」という仮定について、赤現示の長さは大畑・桑原<sup>3)</sup>よりプローブデータのみを用いて推定する手法が提案されている。以上より、本研究で設定した仮定は信号交差点を含む一般道においては妥当な仮定である。

#### (1) プローブ軌跡の「停止」に着目した推定

1 本のプローブ軌跡の「停止」情報から交通量を推定する手順を示す。

ここで $s$ は対象区間の下流から数えたプローブ車両の停止の数である。上記の手順1から3までをプローブ車両の停止の回数だけ繰り返し、最上流まで達したら手順4へ進む。



次にそれぞれの手順について詳しく見ていく。

#### a) 手順1. 停止に影響を及ぼした交差点の特定

まずプローブ軌跡が停止状態から発進し始めた地点から backward wave を引く。引いた backward wave が赤現示と交わらなかった場合は、図-2の左図のように、赤現示の終わりと backward wave が近い方の交差点から発進波が出ていると考える。そして、発進波が赤現示終わりから出るように発進波の傾きを調整する。引いた backward wave が赤現示と交わった場合は、発進波は赤現示終了時から発生するので、図-2の右図のように、backward wave を赤現示終わりから引き、プローブ軌跡と交わったところまでを発進波とする。

#### b) 手順2. 停止波の決定

プローブ軌跡が停止し始めた地点と赤現示の始まりを結ぶことで停止波を引く。停止波が出る赤現示は、手順1で特定した発進波を引いた赤現示と同じものとする。ただし、この時停止波の傾きが backward wave 以上になってしまった場合はプローブ軌跡が停止し始めた地点から backward wave を引き、最も赤現示の始まりと近い交差点から停止波が出ているとする。これは発進波が出た交差点と同じ交差点で、全く動けずに赤現示で2回停止することはないことを仮定している。

#### c) 手順3. (s-1)番目の停止波の訂正

以下の2つの場合に分けられる。

- $s$ 番目の発進波の長さが $(s-1)$ 番目の停止波の長さよりも大きい時

この場合は図-3の左図のように、 $s$ 番目の発進波をプローブ車両の速度に沿って $(s-1)$ 番目の停止波が出ている赤現示の始まりに合うように平行移動し、これを $(s-1)$ 番目の停止波とする。これは赤現示になった直後に停止する車両があると仮定して、この操作を行う。停止波の長さは赤現示の始まりからプローブ軌跡と交わるまでの長さに調整する。

- $s$ 番目の発進波の長さが $(s-1)$ 番目の停止波の長さよりも小さい時

この場合は図-3の右図のように、 $s$ 番目の発進波

を  $(s-1)$  番目のプローブ軌跡の停止地点に合うように平行移動する。これはプローブ車両より前の車両がプローブ車両と同じ速度で走行したと仮定している。そして予め引いていた  $(s-1)$  番目の停止波を、平行移動させた停止波と交わるように引き直し、これらを  $(s-1)$  番目の停止波とする。

#### d) 手順 4. 赤現示に着目した全体の調整

プローブ車両が対象区間を走行し始めてから終えるまでの時間に存在する全ての赤現示について、赤現示の始まりから上流と下流に向かって自由流速度で線を引く。これはプローブ車両以外の車両が自由流速度で走行すると仮定している。そして、図-4 のように引いた線が下流の停止波と上流の発進波の両方と交わった場合、下流の停止波を訂正する。訂正方法は、下流の赤現示始まりと引いた自由流速度の間は上流の発進波と同じ傾きに停止波を訂正する。そして停止波が 1 本の線となるよう、自由流速度の線よりも上流側の区間の停止波の傾きも訂正する。

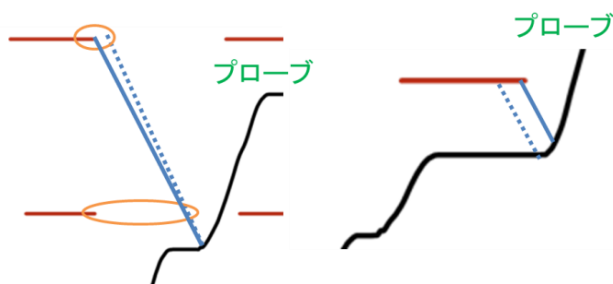


図-2 手順 1 の概念図、左：交差点の特定と発進波速度の修正、右：赤現示と交わった場合の修正

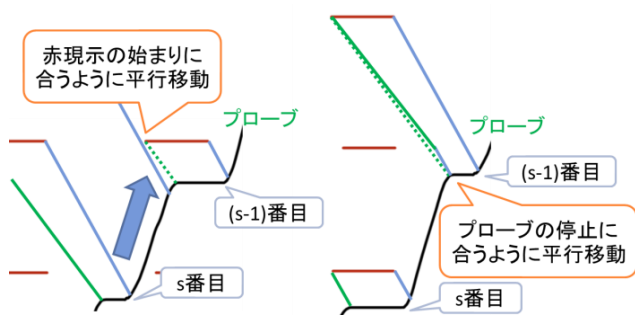


図-3 手順 3 の概念図、左： $s$  番目の発進波の長さが  $(s-1)$  番目の停止波よりも大きい時、右： $s$  番目の発進波の長さが  $(s-1)$  番目の停止波よりも小さい時

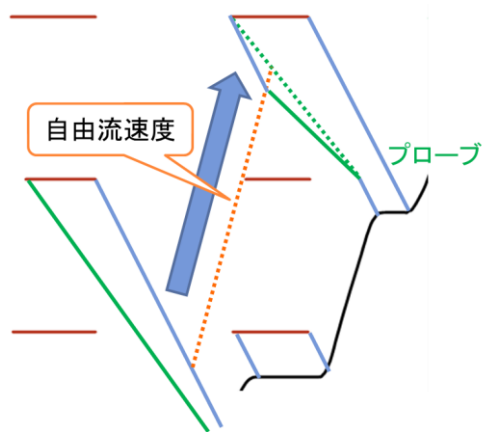


図-4 手順 4 の概念図

#### (2) プローブ軌跡の「走行時」の情報を用いた推定

プローブ軌跡に停止がほとんど見られなかった場合、(1)で提案した手法では推定できる範囲が少なくなる。そこで、走行時の情報から交通量に関する情報を得る手順を以下に示す。示した手順に従うと、図-5 のようにプローブ車両が通過する前の交通量は一定の値以下であることが分かる。

1. 赤現示終わりからプローブ軌跡へ発進波を backward wave speed で引く
2. 赤現示始まりと手順 1 で引いた終点を結ぶ
3. 手順 2 で引いた停止波よりプローブ車両の前が一定の交通量以下であることが分かる

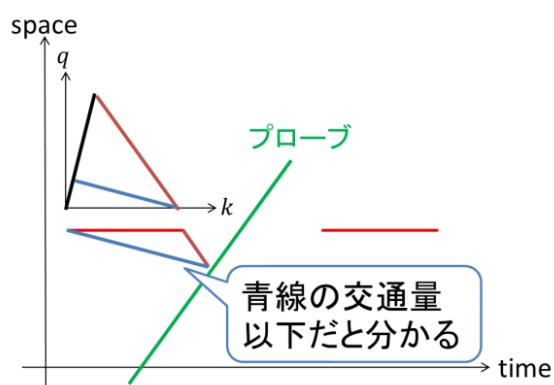


図-5 プローブ軌跡の走行時の情報を用いた交通量推定

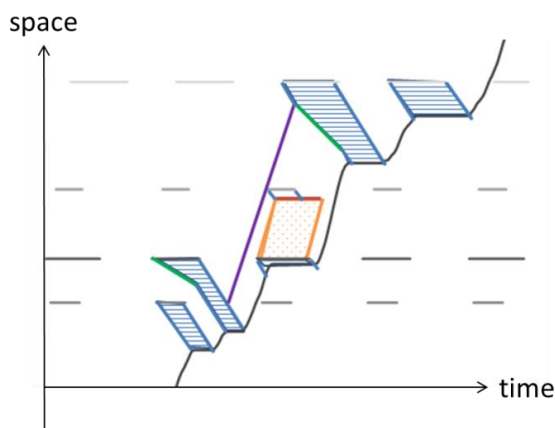


図-6 交通量推定

### (3) 車両が存在しない領域の特定

対象区間途中からの流入及び流出車両を考慮しないということは、赤現示の時間帯には車両が存在し得ない領域がある。その領域の求め方を述べる。

まず赤現示の終わりから backward wave を引く。これは発進波も取り得る最大の速度は backward wave speed であるからである。次に赤現示の始まりから上流にある発進波速度で、発進波がなければ backward wave speed で線を引く。それから1つ上流の赤現示の始まりと終わりで自由流速度で線を引く。これは青現示が終わる1番最後に交差点を通過した車両と、青現示になって最初に交差点を通過した車両が、自由流速度で走行した場合の軌跡である。そして、引いた4本の線で囲まれた平行四辺形の領域は、車両が存在しない領域となる。

ただし、より下流の交差点から待ち行列が伸びてきている場合は、車両が存在しない領域は上記の手法で求めた領域よりも小さくなる。

### (4) 適用例

提案した手法を用いて time-space diagram 上に衝撃波を描いた結果の一例を図-6に示す。横線が赤現示で、黒い滑らかな線がプローブ軌跡である。青で示した領域が停止領域で、橙で示した領域が(3)で特定した車両が存在しない領域である。引いた衝撃波速度より、プローブ車両が通過する前の交通量を推定できる。

## 4. 提案手法の検証

### (1) 検証使用データ

検証使用データは東京都世田谷区から目黒区へ通じる駒沢通りの信号現示データ、対象区間で観測し

たプローブデータ、区間内全ての交差点に設置したビデオ観測より得た車両の通過台数データを用いた。ここは片側1車線道路で、対象区間の距離は約1.6km、区間途中には8つの信号交差点がある。データは2010年12月1日のものである。今回の検証では、プローブ車両の停止が多く見られるように混んでいる時間帯である朝のピーク時の7時30分から8時00分に観測された4台のプローブデータで交通量を推定した。プローブデータは1秒間隔で集められたデータである。

### (2) 検証方法

ビデオ観測より得た各交差点における直進車両の通過台数を真値として、推定が可能な時間における交通量の推定値と真値を比較する。今回は2か所の信号交差点で比較を行った。

仮定した Fundamental Diagram は、自由流速度は実測より30(km/h)とし、backward wave speedは15(km/h)と仮定、飽和交通密度も120(台/km)と仮定した。

提案した手法で衝撃波を描いた後、具体的に任意の地点における交通量を推定する手法を図-7に示す。赤い線で示した場所の交通量を推定するとする。プローブ車両以外の車両は自由流速度で走行すると仮定し、プローブ軌跡よりも前にある赤現示の始まりや停止波の傾きが変わっている地点から自由流速度を引く。すると、図-7の $t_1$ や $t_2$ が求まる。 $t_3$ 及び $t_4$ は交通量を求めたい交差点の赤現示開始及び終了時刻である。 $t_5$ はプローブ車両が交差点を通過した時刻である。結果として、図-7の場合は時刻 $t_1$ から $t_2$ の間の交通量は停止波Aより、時刻 $t_2$ と $t_3$ 間は停止波Bより、時刻 $t_3$ と $t_4$ 間は赤現示のために車両が存在しない領域であるので0台と分かり、時刻 $t_4$ から $t_5$ は停止波Cより交通量を推定できる。

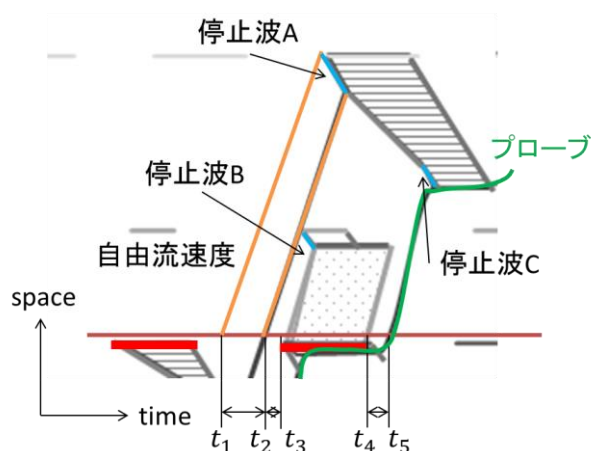


図-7 検証における交通量推定手法の概念図

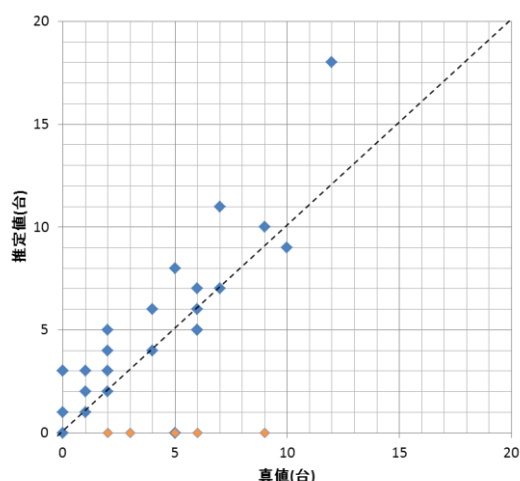


図-8 検証結果

### (3) 検証結果と考察

検証結果は図-8 のようになった。図-8 は横軸に真値の台数を、縦軸に推定値の台数を取った図である。橙の点は、推定値が 0 台であるにもかかわらず真値は 1 台以上の通過があった点である。これは第 3 章の(3)で特定した車両が存在しない領域を通過した車両であり、今回推定の対象外である交差道路からの右左折車である。図-8 の橙の点を除いて検証結果を集計すると、真値と推定値の差の平均値(絶対値)は 2 台、標準偏差は 1.47 台であった。図-8 より全体的に過大推定の傾向にあることが分かる。細かく結果を見ると、1, 2 台程度の推定誤差は、車両の発進遅れによるものと考えられる。それから、2 つ以上上下流の交差点から引いた衝撃波を用いて交通量を推定した部分では、誤差が大きくなることが分かった。また、今回の検証では最大で 199 秒だけプローブ車両が通過する前の交通量を推定できた。

## 5. まとめ

### (1) 本研究の成果

本研究では、信号交差点における衝撃波を考えることで、プローブデータから交通量を推定する手法を提案した。また、実観測より得たプローブデータを用いて提案手法の検証を行った。過大推定の傾向があることと、車両の挙動によって生じる誤差はあるが、平均すると 2 台の誤差でプローブ車両の前の交通量を推定できる可能性があることを示した。検証の数が少ないので更なる検証を進めている。

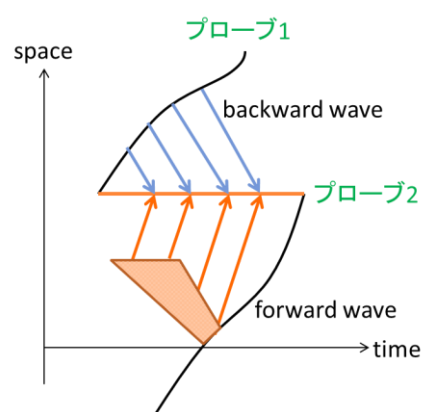


図-9 2本のプローブ軌跡を用いた交通量推定の概念図

### (2) 今後の展望

今回は 1 本のプローブ軌跡だけでプローブ車両が通過する前の交通量を推定したが、推定できる時間が短かった。そこでより長い時間の交通量を推定するために、今後はプローブ軌跡を 2 本用いて、その間の交通量推定手法を考えたい。その概念図を図-9 に示す。2 本のプローブ軌跡の間の交通量は、先を走行するプローブ車両からの backward wave の影響と、後を走行するプローブ車両からの forward wave の影響を併せて考えることで、間を推定できると考えられる。しかし forward wave の影響は、プローブ車両が自由流速度と等しい速度で走行している時は考えるのが困難である。そこで、本研究で提案した手法を用いてプローブ車両が通過する前の交通量を用いることで forward wave の影響を考えられる。

### 参考文献

- 1) B. Mehran, M. Kuwahara, F. Naznin : Implementing Kinematic Wave Theory to Reconstruct Vehicle Trajectories from Fixed and Probe Sensor Data, 19<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.247-268, 2011.
- 2) 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫: プローブカーによる車間距離データを用いた交通状態推定の提案, 土木計画学研究講演集, Vol. 46, No. 104, 2012.
- 3) 大畑長, 桑原雅夫: プローブ車両軌跡データのみを用いた停止領域の推定手法に関する研究, 土木計画学研究講演集, Vol. 45, No. 56, 2012.

(2013. 8. 2 受付)

Traffic volume estimation for signalized intersections using a probe vehicle trajectory

Keiko KOBAYASHI, Kentaro WADA and Masao KUWAHARA