

衝撃波速度を用いた プローブカーデータによる突発事象検出手法

牛木 隆匡¹・日下部 貴彦²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

²正会員 東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)
E-mail:t.kusakabe@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)
E-mail:asakura@plan.cv.titech.ac.jp

交通事故に代表される道路上での突発事象の検出手法の多くは、車両感知器から得られるデータを用いるが、高精度の検出には高密度な車両感知器の設置が必要であり、地方部の道路や発展途上国などでは、困難なことが多い。そこで、本研究ではプローブカーデータを用いた突発事象検出手法の提案を行う。本研究の手法は、プローブカーにより渋滞の末尾を抽出し、衝撃波の伝播速度に基づいて交通容量の低下を検知することで突発事象を検出するものである。提案した手法について、交通流シミュレータによる検出精度、検出時間の検証を行った。その結果、交通集中が原因の渋滞に対する誤検出を減らすことができる一方で、検出にはプローブカーの混入率が5%程度必要であることが示された。

Key Words : incident detection, probe vehicle, shockwave theory, microscopic traffic simulation

1. はじめに

交通事故に代表される「突発事象」が発生した際、いつ・どこでそれらの事象が発生したかを検出することは、利用者への正確かつ迅速な状況提供により事象の影響を最小限にするという観点からも、重要なことである。突発事象の検出は利用者の通報や交通管制用のCCTVカメラ画像の監視などの人の目により行うことも可能であるが、人による検出を支援・強化する自動的な検出システムを導入することで、より早い突発事象の検出が可能となると期待されている。

従来の突発事象検出手法を分類すると、車両感知器などの定点観測機器から得られる観測値を用いて検出を行う手法、プローブカーなどの移動体観測による観測値を用いて検出を行う手法に大別することができる。定点観測機器を用いた検出手法として、交通量やオキュパンシなどの交通状態の時間的・空間的な変化から突発事象の検出を行う手法が開発されている。例えば、Payne¹⁾のCalifornia algorithmやLin *et al.*²⁾のUCB algorithmなどがある。比較的交通量が少なく、定点観測機器の設置間隔が広い都市間高速道路などでは、高精度な事象の検出や発生場所の特定は難しいといえる。

プローブカーなどの移動体観測による検出手法は、GPS等によって得られた車両の位置情報を通信端末によって管制システムにアップロードすることにより、車両一台一台の走行データをもとに検出を行う手法である。この手法は、定点での観測機器を必要としないため、車両感知器の整備が十分ではない道路での事象の検出にも対応できると期待される。一方、プローブカーの普及率が低いと、車両感知器から得られる集計値（例えば交通量、交通密度、オキュパンシ）を得ることは難しいことから、既往の定点観測データによる突発事象検出手法をそのまま適用することはできないと考えられる。近年、プローブカーデータの活用に関して、国内外含め積極的な研究が行われており、突発事象の検出に関しても例外ではない。既存の手法として、例えば、Petty *et al.*³⁾はプローブカー個々の加速度と速度を用いて検出を行う手法(Probe-UCB algorithm)を提案した。この手法は、突発事象と交通集中渋滞との区別が難しく、検出精度は高くない。また、牛木ら⁴⁾は複数台のプローブカーデータを用いて、旅行時間の空間的な変化とボトルネック直下流のプローブカー通過台数の時間的な変化を閾値と比較することにより、突発事象による交通容量低下をとまなう渋滞と交通集中による交通容量低下をまなわない渋滞を判別し

た上で、突発事象を検出する手法を提案している。しかし、この方法では、データの蓄積期間を設け複数台のプロブカーの通過台数を数えるため、検出までに要する時間が長くかかるという問題点がある。

交通容量の低下は、既往の研究のようにデータの蓄積期間を設けプロブカーの通過台数を求める以外にも、交通流の性質より衝撃波の伝播速度と車頭間隔の変化から推定できると考えられる。プロブカーデータを用いて、突発事象発生にともなう渋滞の衝撃波の伝播速度と車頭間隔の変化を求めることができれば、データの蓄積期間を設定することなく、既往のプロブカーを用いた方法より短い期間で突発事象を検出できると考えられる。

そこで本研究では、プロブカーデータを用いて衝撃波速度と車頭間隔の変化を捉えることで交通容量の低下を検出したうえで、突発事象の検出を行う手法を構築することを目的とする。第2章では、衝撃波速度の変化に基づいた突発事象検出手法を提案する。第3章では、交通流シミュレータによる提案手法の検証を行い、第4章で結論を述べる。

2. 突発事象検出の方法

交通集中渋滞と突発事象による渋滞は、どちらもボトルネック(BN)部の交通容量が上流部の需要に対して小さい場合に発生することが共通している。突発的事象によって発生したBNの検出を行うためには、交通集中渋滞の場合と同様、BN上流部・下流部の速度や旅行時間を比較することで判別することが可能であると考えられる。一方で単独のプロブカーの旅行時間や速度の変化のみからそのBNが突発的に発生したものか、サグ等による交通集中渋滞かを判別することは容易ではないと言える。交通集中渋滞と突発事象による渋滞の相違点の1つは、BN直下流部に交通容量の低下が見られるかどうかである。突発事象が発生した場合、道路上に車線閉塞区間が発生するため交通容量の低下が見られる。このことにより、渋滞を伴う突発事象のBN直下流部では、交通量の低下が観測されるはずである。

本研究の手法は、渋滞末尾の検出、2台のプロブカーの渋滞末尾位置からのBN位置の特定、交通量低下の確認からなる。一般に、衝撃波の伝播速度は、交通量、交通密度、速度のうち2変数が既知であれば求められる。しかし、これらの変数のうち交通量、交通密度は、位置測定のみを行うプロブカーのデータからは得ることができない。したがって、本研究では交通量、交通密度の関係を用いずに、プロブカーによって観測された速度と位置データのみから衝撃波の伝播速度を求め、BN位置の特定と交通量の低下を判別する手法を構築する。ま

た、突発事象の検出に時間を短縮するために、BN通過時のデータは用いず渋滞末尾でのデータを用いる。

(1)で渋滞末尾からのBN地点の検出方法について述べ、(2)で衝撃波を通過した2台のプロブカーによる位置・速度データと交通量の低下割合の関係についてまとめる。(3)では、プロブカーデータに基づいて検出を行う際の具体的な手順について示し、(4)で提案手法の特徴についてまとめる。

(1) 衝撃波の伝播速度を用いた突発事象発生位置検出の方法

BN位置の特定方法には、最も単純な方法として、停止波を通過したプロブカーが、さらにBN位置を通過し、速度が回復することを観測すればよいと考えられる。しかし、この方法の場合、渋滞に巻き込まれたプロブカーがBNを通過するまでの間、BN位置を特定できないことから、渋滞流の速度が遅い場合には突発事象の検出に時間がかかることが想定される。そこで本研究では、BNの通過時ではなく、渋滞末尾での観測をもとに衝撃波速度を求め、渋滞末尾位置と衝撃波速度の関係からBN位置を特定する。

図-1は本手法の変数を時空間図で示したものである。BNの交通容量を超過した交通需要が到着するとBNの上流に渋滞が発生する。このとき、非渋滞流と渋滞流の不連続面が生じ、図-1中の停止波の衝撃波が発生する。本研究では、渋滞の末尾断面に着目し、停止波の延伸速度を突発事象による衝撃波速度と呼ぶ。

本研究では、衝撃波を通過したプロブカー P_a 、 P_b 、渋滞発生直前に観測されたプロブカー P_c を用いて、BN位置を特定する。

P_a 、 P_b の速度変化等によって求めた渋滞末尾について、観測した時刻と位置をそれぞれ時空間座標上の点 $a(t_a, x_a)$ 、 $b(t_b, x_b)$ とする。これらの座標を用いて衝撃波速度を求めると次式になる。

$$u_{sw} = \frac{x_a - x_b}{t_a - t_b} \quad (1)$$

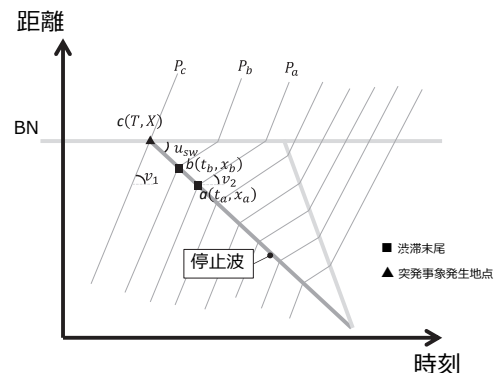


図-1 衝撃波と突発事象発生地点の概念図

ここで、渋滞発生の地点・時刻が求まらなければ、渋滞発生直前に観測されたプローブカー P_c を特定することができない。これは、プローブカー P_c は、突発事象の直前を走行したものであり、渋滞に遭遇することなく通常の走行をしていることが期待され、なんらかの検出を P_a 、 P_b より前に行うことができないためである。したがって、プローブカー P_b の前を走行したプローブカー軌跡に対して、点 a 、 b を通る直線を外挿し、プローブカー軌跡との交点 $c(T, X)$ を求める。軌跡上の点 c の前後で渋滞が無い場合に、プローブカーを P_c とした上で、点 c を BN、すなわち突発事象の発生地点の候補とし、次節で述べる関係から交通量の低下が認められれば、突発事象発生地点として確定する。

(2) 突発事象発生時の交通量の低下と衝撃波の伝播

図-2、図-3 は、交通容量の低下と衝撃波の関係を示すために、BN を先頭とした渋滞が発生している場合の速度-密度 (q - k) 関係図と時空間図を示したものである。

衝撃波速度は、一般に不連続面での交通流率の変化と交通密度変化の割合の比で表すことができる。渋滞の末尾断面下流の非渋滞流区間における交通需要を q_1 、速度を v_1 、交通密度を k_1 とし、末尾断面下流、つまり渋滞流区間における交通流率を q_2 、速度を v_2 、交通密度を k_2 とする。このとき q - k 関係と衝撃波速度は、式(2)の関係がある。

$$u_{sw} = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2} \quad (2)$$

このことは、図-2 から確認できる。この式を、交通量、速度、密度の関係から、交通量と速度のみで示すと、

$$u_{sw} = \frac{q_1 - q_2}{q_1/v_1 - q_2/v_2} \quad (3)$$

と表すことができ、この式より、交通量の変化割合は、

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{v_2}{v_1} \frac{v_1 - u_{sw}}{v_2 - u_{sw}} \quad (4)$$

と表すことができる。

プローブカーデータからは位置情報と速度のみが利用可能であることから、図-3 のようにプローブカー2 台の停止波上の位置と時刻、渋滞領域と非渋滞領域での速度で、式(4)を書き換えると、

$$u_{sw} = \frac{X - x_a}{T - t_a} \quad (5)$$

の関係より、

$$\begin{aligned} \frac{q_2}{q_1} &= \frac{v_2}{v_1} \frac{v_1 - (X - x_a)/(T - t_a)}{v_2 - (X - x_a)/(T - t_a)} \\ &= \frac{(T - t_a) + (X - x_a)/v_1}{(T - t_a) + (X - x_a)/v_2} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。この式の分子と分母はそれぞれ、非渋滞領域における車頭時間及び渋滞領域での車頭時間となっている。このことから、式(6)はプローブカーデータより、車頭

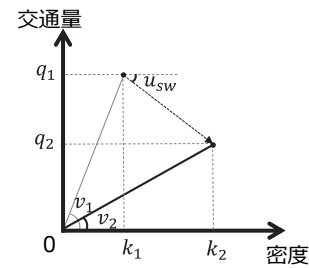


図-2 衝撃波速度と q - k 関係

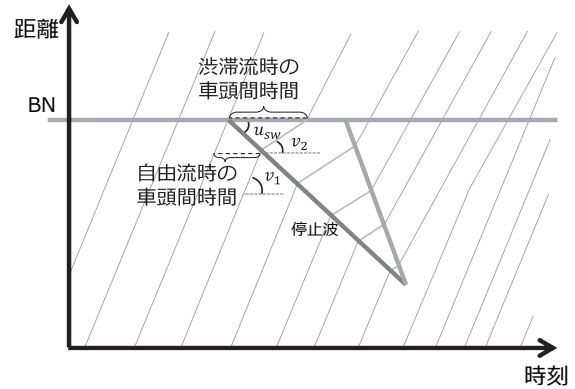


図-3 衝撃波速度と時空間図

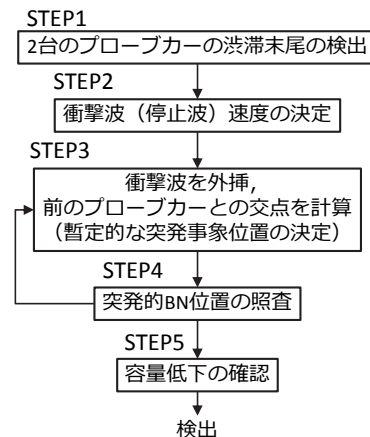


図-4 突発事象検出の流れ

時間の延長の割合を求めることにより、間接的に交通量の変化割合を表していると解釈できる。

(3) 検出手順

図-4は本研究での突発事象の検出手順をまとめたものである。図に示すように、STEP1～5の5つの段階で検出を行う。STEP1では、個々のプローブカーの速度の変化を用いることで渋滞の末尾を検出する。STEP2では、式(1)の衝撃波速度を求める。ここで、2車線以上の道路の場合、渋滞末尾が車線によって異なることや観測誤差やドライバーの特性などデータに微小な変動が発生することを想定し、突発事象が原因であるBNを先頭とした渋滞の末尾以外のものを取り除くことを目的として、2台のプローブカーの渋滞検出の距離・時刻および衝撃波速度が閾値以内のものを採用する。STEP3, 4では、(1)で述

べた渋滞発生直前に観測されたプローブカー P_c を一定の閾値内にある全プローブカーの軌跡から探索し、衝撃波と P_c の軌跡との交点 $c(T, X)$ を求めBN位置を特定する。STEP5では、(2)で述べた交通量の低下率を求め一定の閾値以上の低下をしているものについて突発事象として検出する。なお、STEP1~5で設定閾値内に該当する指標や点が求まらない場合は未検出として終了する。

STEP1~5の閾値に必要な変数は V_d , U_d^{sw} , U_u^{sw} , R_h である。閾値 V_d は、STEP1で渋滞末尾を検出するための速度低下量の下限値である。 U_d^{sw} と U_u^{sw} は、STEP2で用いる衝撃波速度 u_{sw} の上下限値である。 R_h は、STEP5の交通量の変化率 q_2/q_1 の上限値を示している。また、プローブカーの探索範囲として以下の条件を設定する。点 a と点 b 間の距離と時間差については、 $t_a - t_b \leq 600$ (s), $x_a - x_b \leq 1000$ (m)とし、点 c と点 b 間の距離と時間差は、 $t_b - T \leq 600$ (s), $x_b - X \leq 1000$ (m)とした。

以上に述べた手順を具体的に示したものが以下である。

STEP1：渋滞末尾の検出 (図-5)

各プローブカーの軌跡に沿って、各車両の時刻毎の速度の変化（速度差）を調べ、速度差が閾値 V_d より大きい場合はその地点を速度低下位置、すなわち渋滞末尾（図中の星印）とする。ただし、観測値のエラー等による変動を小さくするため、各プローブカーの速度は20秒移動平均をとった上で用いる。

STEP2：衝撃波速度の決定 (図-6)

STEP1で検出された複数台のプローブカーで検出された渋滞末尾から2点 $a(t_a, x_a)$, $b(t_b, x_b)$ (ただし、 $t_a > t_b$) を選び、2点間の直線の傾きより衝撃波速度 u_{sw} を求める。この時、 $U_d^{sw} < u_{sw} < U_u^{sw}$ を満たす場合のみ、衝撃波を抽出する。また、点 a , b を抽出したプローブカーをそれぞれ P_a , P_b とする。ただし、2点間が時間的・空間的に離れている場合、すなわち $t_a - t_b \leq 600$ (s), $x_a - x_b \leq 1000$ (m)を満たさないものは抽出しない。

STEP3：衝撃波を外挿、前のプローブカーとの交点を計算 (暫定的な突発事象位置の決定) (図-7)

STEP2で決定した u_{sw} より、点 a , b を通る衝撃波を外挿し、 P_b より前の時刻に走行したプローブカーの軌跡との交点 $c(T, X)$ を求める。ただし点 b , c 間が時間的・空間的に離れており、 $t_b - T \leq 600$ (s), $x_b - X \leq 1000$ (m)を満たさない場合は衝撃波を外挿しない。

STEP4：突発的BN位置の照査 (図-7)

STEP3で衝撃波との交点 $c(T, X)$ を求めたプローブカーがBN地点を速度低下なく走行したかどうかを確認する。具体的には、このプローブカーがSTEP1で渋滞末尾を検出していないかと、速度変化が P_a の速度変化より小さいかを確認する。どちら

かの条件を満たさない場合は、さらに前を走行したプローブカーに対してSTEP3を実施し、STEP4の照査を行う。

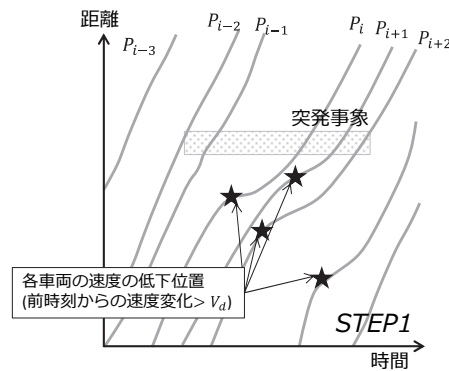


図-5 STEP1の概念図

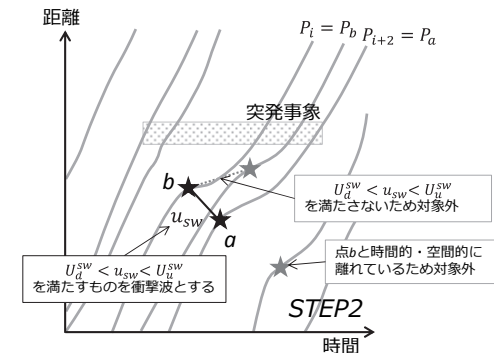


図-6 STEP2の概念図

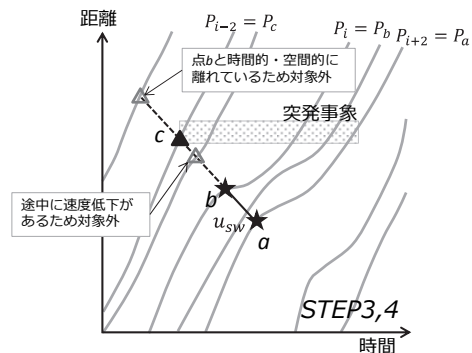


図-7 STEP3,4の概念図

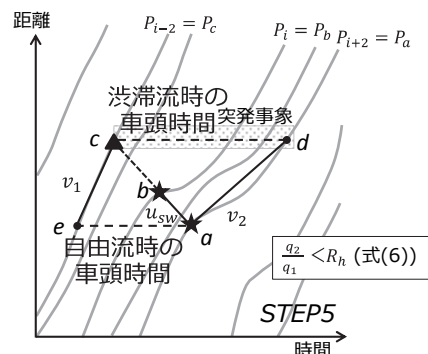


図-8 STEP5の概念図

STEP5：容量低下の確認 (図-8)

最後に容量の変化割合を式(6)の q_2/q_1 を用いて求め、 q_2/q_1 が閾値 R_h より小さい場合、突発事象が発生したと判断する。なお、図に示した通り、点 a, b, c 及び突発事象区間前における速度 v_1 、 P_a の渋滞流中の速度 v_2 がわかっているため、 q_2/q_1 は求めることができる。また、交点 c が突発事象発生地点及び時間と推定され、点 a の時刻 t_a が事象を検出した時刻となる。

(4) 手法の特徴

本手法の利点の1つとして、点 a, b, c を示す最低3台のプロブカーによって検出ができるため、突発事象の発生から検出までの時間を小さくすることができる。また、 $q-k$ 関係を直接的には用いないため、定点データの必要がないという特徴がある。

その一方、突発事象の発生位置及び時刻(点 c)を求めることに特化しているため、点 c の検出ができなかった場合に検出することができないアルゴリズムになっている。特に、突発事象が交通集中渋滞の末尾で発生した場合には、本来 c 点となるべき点が渋滞末尾として検出されるため、検出が不可能となることが想定される。また、衝撃波の検出には、速度の変化を用いているため渋滞中に発生した突発事象などで、衝撃波前後の速度の変化が小さい場合には、渋滞末尾の検出ができない可能性がある。

4. シミュレーションによる精度の検証

突発事象検出手法の精度を確認するため、シミュレーションを用いた検証を行う。シミュレーションでは、TSS-Transport Simulation Systems社のマイクロ交通流シミュレータAIMSUN7.0⁹⁾を用いた。(1)では、検証に用いるシミュレータの設定について示す。実際に車両感知器から得られたデータを用いてシミュレータのパラメータをキャリブレーションし、交通状態や突発事象の発生状況を再現する。ここから得られた個々の車両の走行データに対して提案した突発事象検出手法を適用し、検出結果を(2)で定義する評価指標を用いて、(3)に示す手順で検証する。(4)ではシミュレータによる精度の検証結果を示す。

(1) シミュレータの設定

a) 対象路線・期間

本研究では、首都高速道路3号渋谷線下り、谷町JCT～用賀ICまでの11.77kmをシミュレータで再現した。対

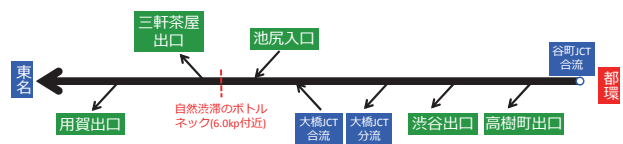


図-9 首都高速3号渋谷線路線図

象の道路区間を図-9に示す。対象路線は全区間2車線であり、日中の交通量が3000～4000台/時、制限速度は全区間60km/hである。池尻入口～三軒茶屋出口の6.0kp付近にはサグがあり、深夜を除く多くの時間帯で交通集中渋滞が発生している。

本研究では、実際の車両感知器のデータを用いてシミュレータのキャリブレーションを行い、実際の交通状況を再現した。現況再現の詳細は、Nguyen *et al.*⁶⁾ を参照されたい。実験期間は、2012年7月1日(日)～9月28日(金)の計90日間である。

プロブカーは、シミュレータ上の車両を所与のプロブカー混入率に応じてランダムに選択して用いた。

b) シミュレータ上での突発事象の設定

a)に示した路線に対して、シミュレータAIMSUN7.0の突発事象発生モジュールを用いて、突発事象を発生させる。突発事象に関しても実際の発生状況を記録したデータを用いる。なお、このデータは事象が発生していることを交通管制室の管制員がCCTVカメラなどを元に判断した際に記録されるものであり、警察などが当事者に聞き取りをして記録したもの(いわゆる、事故調書)ではなく、事象発生の記録そのものでもないことに留意されたい。事象により閉塞されている距離や車線数などはこのデータからは不明であるため、シミュレーション内で発生させたすべての事象で200mの閉塞距離、左側一車線閉塞とした。また、管制システムの記録の一部として記録されているため、路線上での集計区間単位(200～300m単位)で発生したことと、発生時刻・継続時間は、5分単位で記録されている。期間中、対象路線上では計42件の突発事象が発生しており、これらが検出手法に対する正解データとなる。

(2) 評価指標

突発事象検出手法の精度を評価する際には、正解データに対して、「どれほど正しい検出をしているか」、「誤った検出をしていないか」、「どれほど早く検出できたか」を評価することが必要である。そこで本研究ではこれらの指標として、正検出率(Detection Rate: DR)、誤検出率(False Alarm Rate: FAR)、平均検出時間(Mean Time To Detect: MTTD)の3つを用いる。

a) 正検出率(Detection Rate: DR)

DRは、一定期間内に検出アルゴリズムによって正しく検出された突発事象の数と期間内の突発事象総数の比

であり、以下の式(7)で表す。

$$DR = \frac{\text{期間内に正しく検出された突発事象総数}}{\text{期間内の突発事象総数}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

本研究では対象期間における突発事象の総数は 42 件であるので、分母は 42 となる。

b) 誤検出率(False Alarm Rate: FAR)

FAR は、一定期間内に検出アルゴリズムが誤って突発事象であると警告を発した回数と総点検回数の比であり、以下の式(8)で表す。

$$FAR = \frac{\text{誤検出回数}}{\text{総点検回数}} \times 100 (\%) \quad (8)$$

例えば、5 分毎に事象の有無を点検するとすれば、1 時間に 12 回の点検を行うことになり、そこで全く突発事象が発生していなかったが検出アルゴリズムによって 2 回の警告が発せられた場合、 $FAR = 2/12 \times 100 = 16.7 (\%)$ となる。誤検出に関しては一日の平均誤検出数(期間中の誤検出数を日数で割った値)も合わせて表示する。

c) 平均検出時間(Mean Time To Detect: MTTD)

MTTD は、第 i 番目の突発事象に対して、検出アルゴリズムが事象を検出した時刻 t_i^* と実際の事象発生時刻 t_i との差を期間内に正しく検出された突発事象(n 回)に対して平均したものであり、以下の式(9)で表す。

$$MTTD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i^* - t_i) \quad (9)$$

d) 各指標の関係

DRは高く、FARは小さく、MTTDは小さいのが理想であるが、これら3つの指標には互いにトレードオフの関係がある。例えば、DRを高くするために突発事象であると判断する閾値を低く設定すると、FARも高くなってしまふ。逆にFARを低くしようとするとうDRも低くなってしまふ。また、FARを低くすることなどを目的に、渋滞末尾の検出の基準などを高く設定してしまふと、該当の現象を検出することが難しくなり、MTTDが増加する可能性がある。以上のことからこの3つの評価指標は同時に評価される必要がある。

(3) 評価手順

本研究の手法は、以下のa)~d)に示す手順で評価する。a)では、検出手法のパラメータによる検出精度を評価するため、本手法のパラメータである V_d 、 U_u^{sw} 、 R_h の3つの閾値を変化させ、DRとFARの関係を確認する。閾値は、 $V_d = \{30, 40, \dots, 70 (km/h)\}$ 、 $U_u^{sw} = \{-1.0, -3.0, \dots, -9.0 (m/s)\}$ 、 $R_h = \{0.0, 1.0 \times 10^{-4}, 5.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-3}, 5.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-2}, 5.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-1}\}$ のすべての組み合わせで行う。なお、 U_u^{sw} は、 $-10 (m/s)$ の一定値とする。また、DRが一定以上でかつFARが最小な場合を「基準を満たす閾値の組み合わせ」として取り扱う。具体的には、 $DR > 50.0 (\%)$ でかつFARが最小な閾値の組み合

表-1 プローブカー混入率ごとのプローブカー車頭時間

プローブカー混入率(%)	平均車頭時間(分)
0.1	25.3
0.5	5.0
1	2.6
5	0.51
10	0.25

わせについて詳細に分析する。

b)は本手法で検出できなかった事象について評価を行う。突発事象の規模によっては周囲の交通状況に影響を及ぼさない場合も考えられる。そのような事象はプローブカーデータのみで検出することは困難であると言える。そこで、突発事象の規模に応じた検出結果を評価する。

c)では、プローブカー混入率の違いによる精度の比較を行う。本研究では、プローブカー混入率を{0.1, 0.5, 1, 5, 10}%の5種類で設定し、0.1%とプローブカーが少ない状況から、10%と将来的に普及率が増加していくことを加味した状況までを実験シナリオとして想定する。なお、実験路線におけるプローブカー混入率をプローブカーの車頭時間として表-1に整理した。

d)は、本手法と既存の手法との比較を行う。既存の手法として、車両感知器による突発事象検出手法のPayne¹⁾のCalifornia algorithm、プローブカーによる突発事象検出手法のPetty *et al.*³⁾のProbe-UCB algorithmを用いる。California algorithmは、定点で観測された集計値であるオキュパンシンの時間的・空間的变化を3つの閾値を用いることで検出を行う手法であり、既存の研究においても精度の比較の際にも多く引用される手法である。Probe-UCB algorithmはプローブカー個々の加速度と速度を用いて検出を行う手法である。

(4) 結果

(3)で述べたa)~d)の評価手順に沿って結果を示す。

a) 本手法の精度

図-10は、本手法のDRとFARを、様々な閾値の組み合わせで評価したものである。例としてプローブカー混入率5%の結果を示す。この図から全体の傾向として、FARの増加に伴いDRが増加するという関係がわかる。

表-2は、(3)で述べた基準を満たす閾値の組み合わせにおける評価指標の値である。この組み合わせでの閾値は、 $(V_d, U_u^{sw}, R_h) = (60, 1.0, 0.0005)$ の場合であった。この閾値の場合、全体の50.0%の突発事象を検出でき、誤検出率は0.00022%に抑えることができている。誤検出は1日平均5件程度発生したこととなる。また、その時の平均検出時間は(MTTD)は6.4分であった。個別の突発事象について見ていくと、1.6分で検出できた例もあり、最低3台のプローブカーで検出ができるという本手法の特徴が得られた。

閾値と精度の関係をみるために、 U_u^{sw} を{-1.0, -3.0, ..., -9.0}で変化させたが、混入率5%の場合だけでなく、プ

プローブカー混入率が0.1, 0.5, 1, 10%のいずれの場合でも $U_u^{sw} = -1.0$ が基準を満たす閾値の組み合わせとなった。このことより、衝撃波速度については、1.0 (m/s) よりも遅い速度を想定する必要があることが示唆された。

b) 突発事象の規模別の評価

図-11は突発事象の規模別にDRを算出したものである。なお、突発事象の規模は道路が閉塞されていた時間と捉え、車線閉塞時間を突発事象の規模とみなした。第一軸が車線閉塞時間毎の事故件数、第二軸がDRを示す。閾値にはa)で示した基準を満たす閾値の組み合わせを用いた。ここから、本手法では車線閉塞時間1~20分の小規模な事象についても40%程度で検出が可能であることがわかる。本手法では、最低3台のプローブカーで検出が可能であり、小規模な事象であっても、その付近をプローブカーが走行しており、周囲の交通状況に影響を及ぼす事象であれば正確に検出ができることが確認できた。また、車線閉塞時間71分~の場合は正検出率が0%であり、事象の規模が大きくなれば検出精度がよくなるわけではないことがわかる。これは、本手法が突発事象の発生位置及び時刻を求めることに特化しているため、既に発生した突発事象の継続箇所を検出できないアルゴリズムになっていることが原因であると考えられる。

c) プローブカー混入率による比較

表-3は、プローブカー混入率による精度を比較した結果である。なお、閾値にはそれぞれの混入率でa)と同様の基準を満たす閾値の組み合わせを用いた。なお、プローブカー混入率0.1%の場合、本手法ではいずれの閾値の組み合わせにおいても突発事象の検出件数は0件であったため表中には記載していない。また混入率が0.5%の場合も1件しか検出できていない。ここから、プローブカー混入率がおよそ0.5%以下の場合には検出が不可能となる場合が多くなることがわかり、本手法はプローブカー混入率に大きく依存した手法であるということがわかった。原因として、混入率が低い場合、渋滞末尾を検出する2台のプローブカーの距離が乖離しすぎ、別のショックウェーブと判断されてしまうこと、ショックウェーブが検出できた場合も外挿する際、前のプローブカーとの距離が乖離しすぎ、前のプローブカーとの交点を求められないことが考えられる。前のプローブカーとの距離の乖離の条件を緩くした場合も、検出された突発事象の位置・時刻は実際の事象の位置・時刻と大きく異なっている場合が考えられる。一方、プローブカー混入率が5%以上であれば十分な精度で検出が可能であると言える。

d) 既往の手法との比較

表-4は、本手法と既往の手法との精度を比較した結果である。なお、全ての手法に閾値が存在するため、基準を満たす閾値の組み合わせをそれぞれ求めた。それぞれの手法の閾値は表内に示している。また、プローブカー

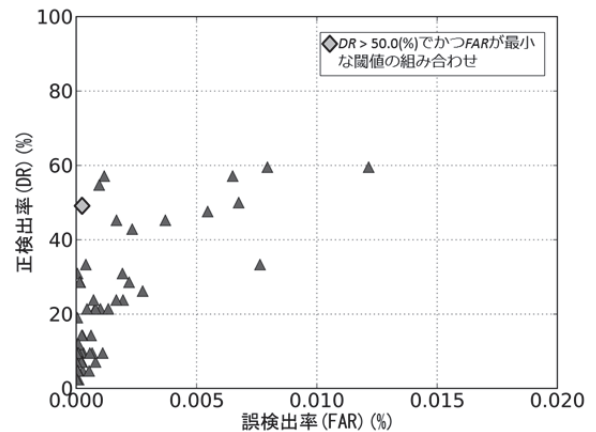


図-10 正検出率と誤検出率との関係(混入率5%)

表-2 基準を満たす閾値の組み合わせにおける検出結果

V_d	U_u^{sw}	R_h	DR (%)	FAR(%) 〈誤検出数/日〉	MTTD (分)
60	-1.0	5.0×10^{-3}	50.0	2.2×10^4 (5.6)	6.4

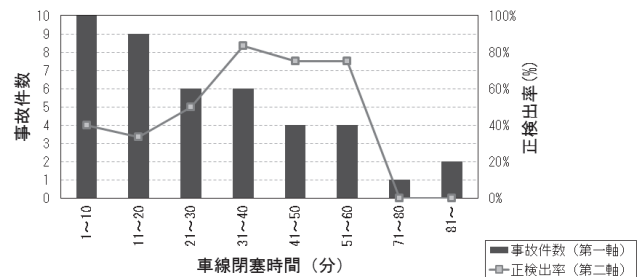


図-11 車線閉塞時間別の正検出率

表-3 プローブカー混入率による精度の比較

混入率 (%)	DR(%)	FAR(%) 〈誤検出数/日〉	MTTD(分)
0.1	0.0	— 〈—〉	—
0.5	4.8	1.5×10^4 (0.4)	11.5
1	19.1	2.1×10^3 (10.0)	7.9
5	50.0	2.2×10^4 (5.6)	6.4
10	47.6	1.0×10^4 (5.9)	4.5

表-4 他の手法との比較

アルゴリズム (混入率)	DR(%)	FAR(%) 〈誤検出数/日〉	MTTD(分)
本手法(5%) (V_d, U_u^{sw}, R_h)=(60,10, 5.0×10^3)	50.0	2.2×10^4 (5.6)	6.4
California ($T1, T2, T3$)=(0.2, 0.1, 0.1)	61.9	2.6×10^2 (2.8)	1.6
Probe-UCB(5%) (v_t, α)=(50, 15)	39.8	1.5×10^1 (688.2)	12.9

データを用いるProbed-UCB algorithmに関しては、混入率を5%とした。車両感知器のデータを用いるCalifornia algorithmと提案手法を比較すると、提案手法の精度がDR, FARともに劣ることがわかる。これは、対象とした区間では車両感知器が高い密度で設置されていることから、California algorithmでよい精度が得られるためである。一方、Probed-UCB algorithmと比較すると大きく精度が向上している。つまり、既存のプロブカーデータによる突発事象検出手法より大きく精度が向上し、車両感知器を用いた検出手法に近い検出精度を得ることができた。

5. おわりに

本研究ではプロブカーデータを用いた突発事象検出手法として、旅行時間の空間的な変化と突発的BN直下流のプロブカー通過台数の時間的な変化を確認し検出を行う手法を提案し、その精度をシミュレータ実験で検証した。

提案手法は、プロブカーデータのみから渋滞末尾から衝撃波速度を求め、これより交通量低下を推定することで、プロブカーによる突発事象検出で課題であった交通集中による自然渋滞が原因となる誤検出を減らすことを意図した手法である。検証の結果、精度がプロブカー混入率に大きく依存し、混入率が5%以上の場合には一定の精度で検出が可能であるが、0.5%以下になるとほとんど検出がされないことが分かった。また、最低3台のプロブカーだけで検出ができるため、検出時間を既往の手法に比べて、小さくできることを示した。提案手法の精度は定点観測による手法よりは劣るものの、プロブカーデータを用いる既存の手法よりも精度は高く、

車両感知器などの定点観測装置を用いることなく一定の精度で突発事象の検出が可能であるといえる。

謝辞：本研究で用いたシミュレータのキャリブレーションで用いた車両感知器のデータは、首都高速道路株式会社から提供していただいたものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Payne H.J. : Development and testing of incident detection algorithms, Volume 1: summary of results., *Report No. FHWA-RD-76-19*, FHWA, Washington D.C., April 1976.
- 2) Lin W.H. and Daganzo C.F. : A simple detection scheme for delay-inducing freeway incidents, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, No. 2, pp. 141-155, 1997.
- 3) Petty. K. F., Skabardonis. A. and Varaiya. P. P. : Incident detection with probe vehicles: performance, infrastructure requirements and feasibility, *Transportation Systems 1997, A Proceedings Volume from the 8th IFAC/ IFIP/ IFORS Symposium, Chania, Greece*, June 16-18, 1997, Vol. 1, pp. 125-130, 1997.
- 4) 牛木隆匡, 日下部貴彦, Nguyen, L. X., 朝倉康夫 : 交通容量低下を考慮したプロブカーデータによる突発事象検出手法, 第 48 回土木計画学研究発表会, 2013.
- 5) TSS-Transport Simulation Systems : AIMSUN 7.0, <http://www.aimsun.com/> (2014/02/28 アクセス)
- 6) Nguyen, L. X., Ushiki, T. and Asakura, Y. : Analysis on the congestion propagation effects influenced by traffic incident using microscopic simulation, *Proceedings of the 18th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, Vol.18, pp. 151-160, 2013.

(2014.4.25受付)

PROBE BASED INCIDENT DETECTION USING PROPAGATION VELOCITY OF SHOCK WAVE

Takamasa USHIKI, Takahiko KUSAKABE and Yasuo ASAKURA