

交通流変分理論の活用を通じた全体最適な速度制御による渋滞発生抑制施策の検討

眞貝 憲史¹・鈴木 英之²・兒玉 崇²・石井 亜也加²・
田名部 淳³・塩見 康博⁴

¹正会員 株式会社地域未来研究所 (〒531-0003 大阪府大阪市北区堂島 1 丁目 5 番 17 号堂島グランドビル)
E-mail: shinkai@refrec.jp

²正会員 阪神高速道路株式会社 計画部 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4 丁目 1 番地 3 号)

³正会員 株式会社地域未来研究所 (〒531-0003 大阪府大阪市北区堂島 1 丁目 5 番 17 号堂島グランドビル)

⁴正会員 立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒527-8277 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1 番地 1 号)

近未来における自動運転車両の普及を踏まえ、新たな時代の交通流マネジメントの検討を行なう必要がある。現在の自動運転車両は自車でセンシングした情報を元に走行することを基本としており、道路交通全体の効率性に対する役割は主眼ではないと考えられる。そこで、本研究では道路交通全体を把握する道路管理者側から制御情報の提供を行い、渋滞発生を抑制する制御手法の検討を行った。

本研究では、まず交通流変分理論 (Variational Theory: VT) を用いて対象区間の全車両の走行軌跡を推定し、交通状況の再現を試みる。次に、渋滞発生直前に多数発生するショックウェーブを車両制御によって解消する手法を考え、その効果を検証する。

Key Words: Variational theory, Traffic congestion, Autonomus vehicles, Traffic control, Jam-absorption

1. はじめに

(1) 本研究の背景

近未来において自動運転技術の普及が予想される中で、それを踏まえた交通流マネジメントの在り方を検討する段階にある。しかしながら、自動車メーカーの考える自動運転技術は、安全装置の延長線上にある役割が強く、道路交通全体の効率性へどのように貢献するかという観点は大きく考えられていない可能性がある。

現在実用化されている自動運転技術の一例として、ACC (Adaptive Cruise Control) がある。ACC は走行速度に応じて車間距離を自動的に調整するため、適切に使用することでドライバーの運転に対する負担を軽減すると同時に、追従挙動の安定やそれに伴う捌け容量の向上等といった効果が期待されている¹⁾。一方で、現行性能の ACC を用いた場合に加速が緩慢になることで車間間隔が大きくなり、逆に捌け容量が低下する可能性も指摘されている²⁾。

車両制御による交通状況の改善では、He et al.³⁾によって、単発的に発生した急減速 (ショックウェーブ) に対して、後続の車両をショックウェーブを回避する形で走

行させることで、それを緩和すると同時に総遅れ時間を短縮できることをシミュレーションで示した。また、塩見ら⁴⁾は渋滞発生に伴う容量低下を考慮したボトルネックを含む単路部において、自動運転車両に対する介入制御による到着時刻調整を実行することで、総旅行時間の短縮に繋がる可能性を明らかにした。

現在の車両のセンシング技術では、200m 程度前方の情報は計測可能であるが、自力での計測には限界があり、はるか前方で発生した急減速や渋滞末尾の情報提供は車両側にも有用であると考えられる。

このような背景の中で、自動運転車両を適切な形で制御することにより、道路交通全体では渋滞発生抑制や事故リスクの低減等の効果に繋がり、車両単位ではスムーズな交通による乗り心地改善や事故回避等の恩恵を得られる路車連携手法を検討する意義はあると考えられる。

(2) 本研究の目的

本研究では、渋滞発生直前の交通状況に対して、道路側から自動運転車両に情報提供を行うことで到着時刻を調整し、渋滞発生抑制を目的とした全体最適な車両制御による効果の把握を目的とする。本研究で考える全体最

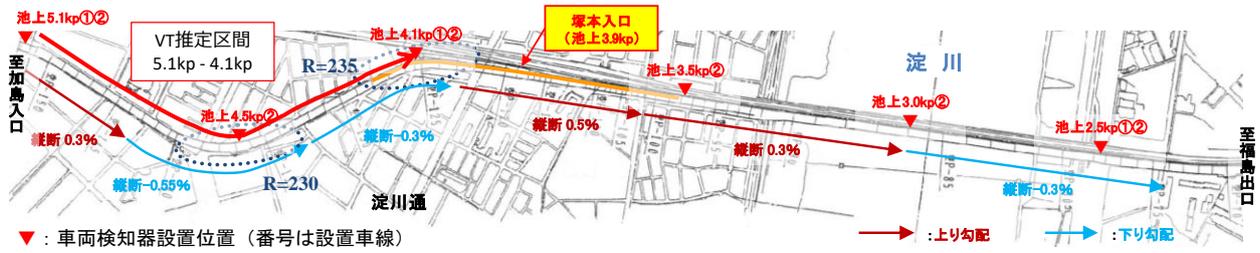


図-1 検討対象区間

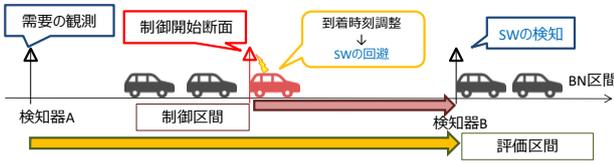


図-2 車両制御のイメージ

適とは、制御による上流側への影響を小さくすることである。車両制御にあたって、交通状況の推定や制御効果の試算には Daganzo²⁰⁾により提案された交通流変分理論 (Variational theory: 以下、VTとする) を用いる。

本研究で検討対象とする区間は、図-1 に示す阪神高速道路 11 号池田線上り塚本入口付近 4.1kp~5.1kp の第 2 車線である。この区間では、塚本入口合流付近で黄線 (車線変更不可) 区間となっていることから、第 1 車線と第 2 車線の間で車両の出入りはなく、車線ごとに交通状況が独立している可能性が高い。したがって、車線別に FD (Fundamental Diagram) を推定し、VT を適用することで、VT の前提条件である FIFO (First-in-First-out) が満たされやすくなると考えられることから、本研究では対象区間の第 2 車線に対して交通状況の推定と車両制御効果の試算を行う。

本稿の構成を述べる。まず、想定する制御アルゴリズムについて 2 節で示す。次に、VT の概要とそれを用いた交通状況の推定が可能であるかを 3 節で示す。4 節では制御に必要なショックウェーブの検知について確認する。そして、5 節で車両制御の効果について試算する。最後に、5 節で本研究の成果をまとめる。

2. 想定する制御手法

本研究で想定する制御のイメージを図-2 に、図-3 に制御の流れを示す。下流側の検知器でショックウェーブ (SW, shock wave) を検知し、その時刻までの情報で VT を用いて延伸状況を予測する。延伸が予測される場合には制御の実行を判定する。

車両制御は、制御対象車両の速度を制御し、VT を用いて下流端で検知されたショックウェーブを回避可能な速度を算出し、対象車両に伝達することで実行することを想定する。VT の計算には、ショックウェーブが検知された段階で、それに含まれる車両の検知開始時刻から検知終了時刻にかけて停止するような境界条件として入

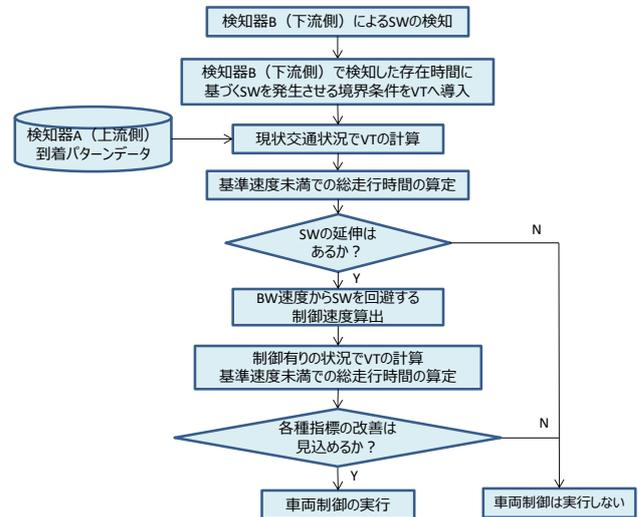


図-3 想定する制御の流れ

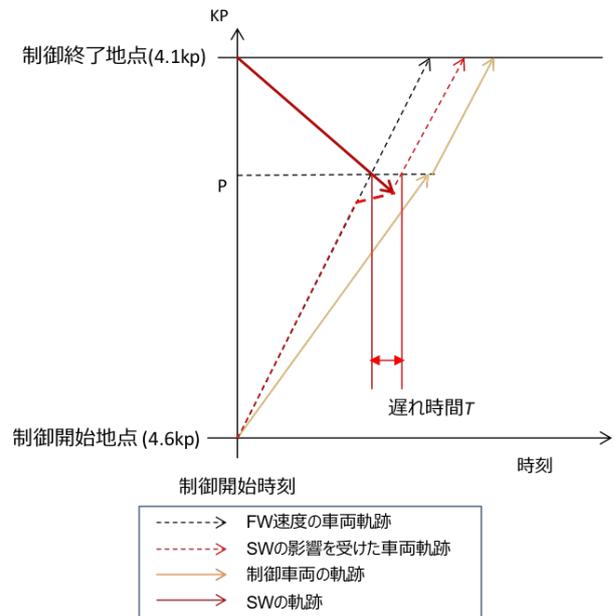


図-4 制御速度の考え方

力し、VT 上で外生的にショックウェーブを発生させることで反映する。

制御速度は、ショックウェーブが検知された時点で算出される自由流走行時間からの遅れ時間に基づいて設定する。その考え方を図4に示す。対象区間の下流端でショックウェーブを検知した段階でVT上で自由流走行速度からの遅れ時間 (図4中 T) を算出することができ

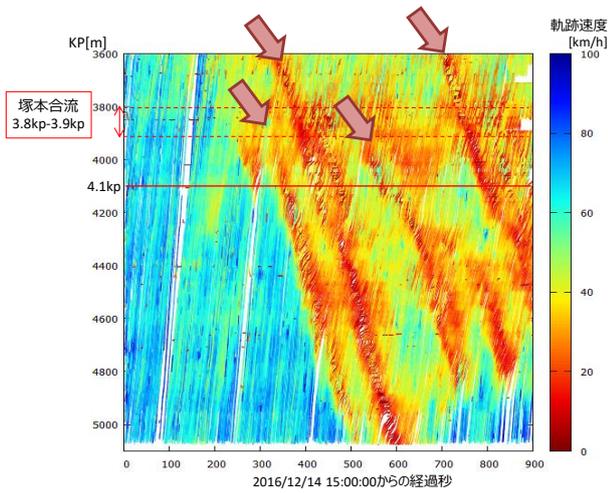


図-5 渋滞直前のショックウェーブ発生状況

る。制御速度は、ショックウェーブ検知後に制御区間に流入する最初の車両が自由流で走行するとショックウェーブに巻き込まれる地点（図4中点P）で、このT以上の遅れ時間で点Pに到着するように設定する。制御はこの点Pを通過した時点で解除し、制御対象車両は再び自由流速度で走行できるようになる。

制御なしの状況でVTによる交通状況の予測を行った後、再度制御車両を導入した状態でVTを用いて制御による交通状況への影響を算出し、制御なしの状態と比較して交通状況の改善が見込まれる場合には制御を実行する。

2016年12月14日15時頃に発生した渋滞の発生直前の交通状況を図-5に示す。この図より、渋滞発生直前にはショックウェーブが、対象区間下流にある塚本合流前後の複数の地点から発生している状況がみられる。これらのショックウェーブに対して、流入する車両の到着時刻を調整することでその緩和を試みる。

3. VTを用いた交通状況の推定

(1) VTの概要

VTはKinematic wave理論に基づいて車両の移動を推定する手法であり、高速道路や一般道でも適用の実績がある⁷⁾。VTによる交通状況の推定の概略を示す。VTはFIFOを仮定した区間において、 u (forward wave speed)と w (backward wave speed)が与えられた場合に、区分線型FDを考え、図-6へ示すような対象区間の時空間にFDを敷き詰め、Forward waveとBackward waveによって構成されるVTネットワークを定義する。

FDの最大フローレートを q_{max} 、最大密度を k_{jam} とする。FDの自由流領域のリンク(fwリンク)はコスト0とし、渋滞流領域のリンク(bwリンク)のコストを $k_{jam}dx = q_{max} dt$

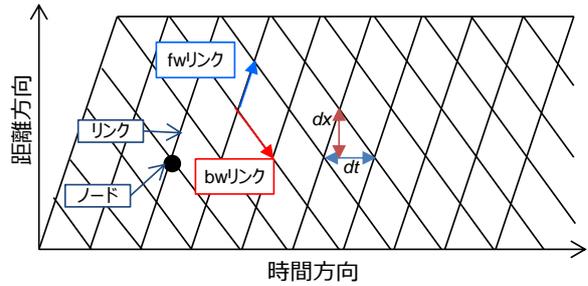


図-6 FD ネットワーク

とする。ここで、 dx, dt は図-6中のFDネットワーク中の微小区間である。この時空間上で累積交通量が既知のノードを境界ノードとする。時空間上で累積交通量が不明なノード j に到達可能な境界ノード i のインデックス集合を Ω_j 、ノード i と j の累積交通量をそれぞれ N_i, N_j とする。ノード i 、ノード j の累積交通量の差分を Z_{ij} とすると、 N_j は以下のように示される。

$$N_j = \inf_i \{N_i + Z_{ij}\}, i \in \Omega_j \quad (1)$$

式(1)において、 Z_{ij} はFDネットワーク上のノード i からノード j 間の最短経路コストで与えられる。全ての Z_{ij} を計算したとき、 N_j は N_i と Z_{ij} の和の最小値となる。したがって、式(1)をFDネットワーク上の全てのノード j に対して繰り返すことで、全ての N_j を計算することができる。実際にVTを適用する場合は、上流端・下流端の累積交通量を検知器パルスデータ等で得られる個別車両の到着時刻から与えればよい。各車両の走行軌跡は、全ての累積交通量が算出されたFDネットワーク上で累積交通量が等しいノードを繋ぐことで求められる。また、VTは流入・流出の条件以外にも、プローブデータのような車両の軌跡データを用いて対象区間内の車両挙動を反映させることで推定精度を向上させることが可能である⁸⁾。

VTはリアルタイムに観測可能な個別車両の到着時刻を境界条件として、Kinematic wave理論に従った理論的な交通状況の推定を行なうことが可能な手法である。さらに、本研究で目的とする渋滞発生直前の交通状況に対する車両制御を行なうにあたっては、計算負荷が小さい手法を適用することが求められる。以上の理由から、本研究ではVTを利用して交通状況の推定、制御車両導入の効果を試算する。

(2) VTの設定

VTの各種設定は表-1に示すとおりである。VTの設定で必要な対象区間のFDは、4.1kpに設置された第2車線車両検知器の2016年12月1ヶ月分のデータを集計し、作成した。

対象区間では、照明柱に設置されたカメラを用いて撮影

表-1 VT の設定

項目	設定値
Forward wave speed	72 km/h
Backward wave speed	19 km/h
交通容量	2,200 台/時間
dt	1.0 秒
計算範囲	阪神高速 11 号池田線上り 5.1kp~4.1kp
計算時刻	15:00~15:15 (2016/12/14)
上流・下流端 流入条件	検知器パルスデータ
走行軌跡データ	各ケース 8 台

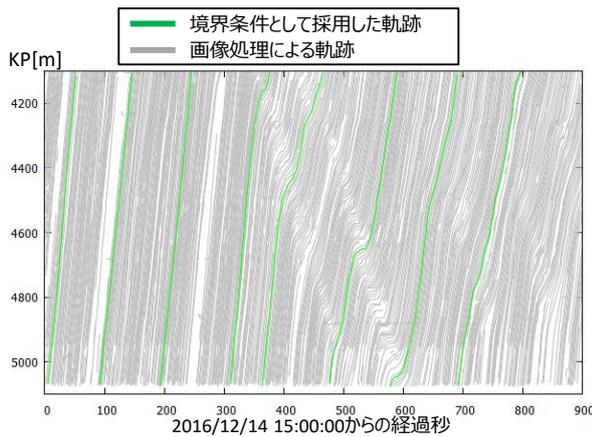


図-7 画像処理による車両軌跡と境界条件

された映像から画像処理によって各車両の走行軌跡が観測されている。交通状況の推定においては、この車両軌跡を交通状況の真値として考え、推定精度を検証する。VT に用いる走行軌跡の境界条件（プローブデータ）として、図-7 に示す画像処理による走行軌跡からランダムに 8 台抽出し、適用した。

また、推定精度の評価指標として、VT の推定軌跡と同時刻に 5.0kp を通過した画像処理による軌跡を同じ車両と考え、到着時刻 RMSE (Root Mean Squared Error) を算出した。

(3) 交通状況の推定結果

VT による交通状況の推定結果を図-8 に示す。下流端の境界条件から速度低下が発生しているのと同時に、走行軌跡の境界条件として適用した軌跡の後続車両に速度低下が発生する状態が見て取れる。

図-7 と比較して、概ねショックウェーブ (SW) の延伸、伝播状況が再現できていることを確認できる。VT は境界条件の車両以外は追従する形で車両が移動するモデルであることから、境界条件となる車両や流出時の条件によって速度低下が発生し、その状況の伝播を表現することができる。

また、画像処理による車両軌跡との RMSE は 12.3 秒

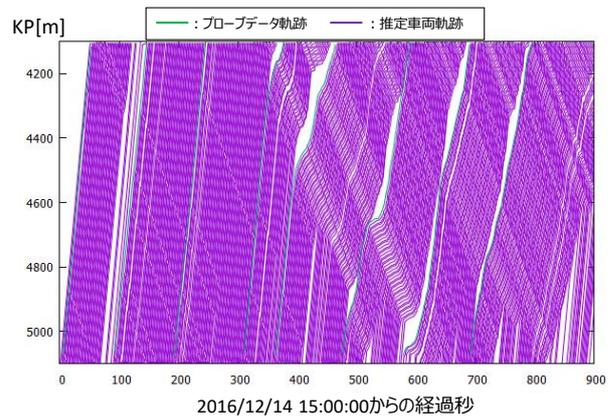


図-8 VT による推定軌跡図

となったことから、VT を用いて概ね対象区間の交通状況が推定可能であることが示された。

4. パルスデータによるショックウェーブの検知

本研究で想定する制御を実行するにあたり、ショックウェーブを検知する必要がある。阪神高速道路の検知器パルスデータでは個別車両の速度を観測することができないため、存在時間をもとにショックウェーブの検知を試みた。

4.1kp のパルスデータより、小型車（低車）の存在時間を示す。低車は比較的車体長のばらつきが小さいため、車体長が原因となる速度推定の誤差は比較的小さくなると考えられる。図-9 に示すように画像解析による軌跡からショックウェーブが発生する状況で存在時間が大きくなり、その後再び小さくなる状態が観測された。

渋滞発生直前の交通状況では、完全に渋滞に陥って速度低下した状況と区別するために、一度存在時間が大きくなった（速度が低下した）状態から、再び小さくなる（速度が回復する）状態をショックウェーブ検知の判断基準とする。

5. 車両制御効果の試算

(1) 評価指標の設定

前節で考えた車両制御手法の効果を試算する。本研究では、下流端でショックウェーブを検知した時刻以降に図-2 で示す制御区間へ流入した最初の車両を制御対象車両であると仮定し、制御効果の算出を行なう。

制御効果の評価指標は表-2 に示す「基準速度以下の総走行時間」、「渋滞量」、「急減速発生回数」の 3 点である。基準速度以下の総走行時間と渋滞量は社会的な効果の指標として考えられ、交通全体に対する制御の効果を測定する。

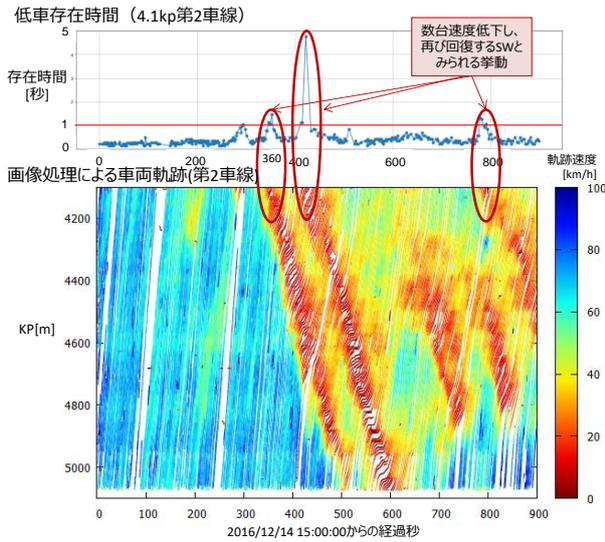


図-9 ショックウェーブの検知

表-2 制御効果の評価指標

SEQ	指標	設定
1	基準速度以下の総走行時間	評価区間内で各車両の走行速度が基準速度(60km/h, 50km/h, 40km/h)以下となった走行時間の累計値
2	基準速度以下の渋滞量	10m×10 秒の空間平均速度を算出し、基準速度(60km/h, 50km/h, 40km/h) 以下となる状態を渋滞状況とみなした場合の渋滞量
3	急減速の発生回数	3 秒間で 40km/h 以上の減速が発生した回数

総走行時間と渋滞量に関する基準速度は 60km/h, 50km/h, 40km/h の3段階を設定した。4.1kp 地点の第2車線の検知器から作成した Q-V 図を図-10 に示す。この区間において、交通量が最大となっているのは 50km/h～40km/h 付近と考えられ、走行速度がこれ以下になった場合には渋滞発生リスクがある状態と考えられる。したがって、基準速度が 50km/h, 40km/h 以下となるケースについては特に注目して評価を行う。

また、急減速発生回数は個別車両に対する制御の効果として考えられる。本研究では 3 秒以内に 40km/h 以上速度低下が発生した場合に急減速として、その発生回数を評価する。

(2) 試算の流れ

制御効果の試算の流れを示す。試算は Step1 と Step2 の2段階で行なう。

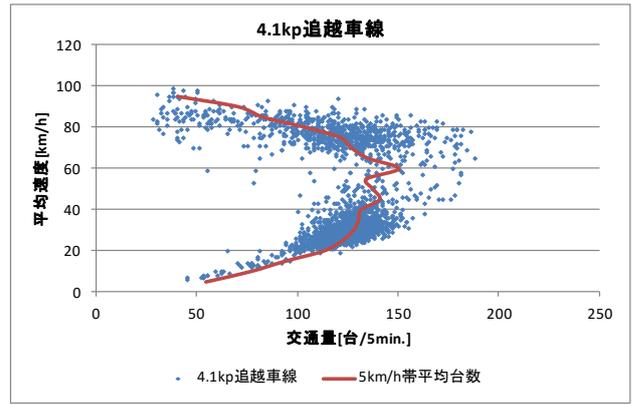


図-10 4.1kp 第2車線の Q-V 図

Step1 では、ショックウェーブが検知された時点までの情報を用いて、制御実行の判定を行なう。上流端の入力条件をショックウェーブが検知された時刻まで入力し、VT 上でその延伸状況を予測する。併せて、制御に必要な制御速度の算出と各評価指標を算出し、制御効果が得られるか判定する。

Step2 では、制御を行った後の交通状況が実際に改善するかを確認する。ここでは、流入する交通量が容量と同等となる最大の流入状況を仮定して制御効果を評価した。実際に制御を行う場合、ショックウェーブを検知した後の未来の情報を得ることはできない。したがって、制御の影響が上流端へ減衰することなく伝わる最大の流入量を仮定し、この状況においても制御の効果が得られるかを確認した。

VT に用いる FD の情報は、表-1 に示す設定で試算する。境界条件は、流入・流出条件はショックウェーブ検知時刻まではパルスデータより実績値を与える。検知時刻以降は、制御によって交通状況が変化するため、下流端では自由に流出できる状態とした。

(3) 試算結果

a) Step1：ショックウェーブ検知時点の評価

4.1kp でショックウェーブが検知された時点までの境界条件をもとに制御実行の判定を行う。表-3 にこの時点で算出可能な制御パラメータを示す。

この場合の基準速度以下の総走行時間と渋滞量をそれぞれ表-4 と表-5 に示す。制御速度が 50km/h となるため、基準速度 60km/h のケースでは総走行時間、渋滞量が共に増加する。しかし、渋滞リスクがあると考えられる 50km/h, 40km/h 以下ではともに指標値が改善しており、基準速度 50km/h では 15%程度、40km/h では 25%程度の改善となる。

ショックウェーブによる極端な速度低下が解消されることから、基準速度以下の総走行時間、渋滞量は共に減少し、制御の効果を確認することができた。

表-3 ショックウェーブ検知時点で算出される制御パラメータ

項目	値
自由流速度からの遅れ時間	7.8 秒
制御速度	50 km/h

表-4 基準速度以下の総走行時間の変化(Step1)

単位: 秒

	60km/h以下	50km/h以下	40km/h以下
制御なし	309	148	78
制御あり	413	125	57
差分	104	-23	-21
差分(%)	34%	-16%	-27%

表-5 基準速度以下の渋滞量の変化(Step1)

単位: 秒 × m

	60km/h以下	50km/h以下	40km/h以下
制御なし	23,100	10,900	7,800
制御あり	31,600	9,300	6,000
差分	8,500	-1,600	-1,800
差分(%)	37%	-15%	-23%

表-6 急減速回数の変化(Step1)

	急減速回数
制御なし	323
制御あり	40
差分	-283
差分(%)	-88%

急減速回数は表-6 に示すように大きく改善し、制御なしケースと比較して 8 割以上減少する。急減速が発生するショックウェーブを回避するため、急減速回数の減少には大きな効果がある。

b) Step2 : 容量と同等で流入があった場合の評価

ショックウェーブ検知後の流入交通状況を交通容量と同等で与えた場合の制御効果を確認する。表-7, 表-8 に基準速度以下の総走行時間と渋滞量を、表-9 に急減速回数を示す。

交通容量と同等の流入があるケースでは、図-11 に見られるショックウェーブと図-12 に見られる制御による速度低下の影響が推定区間の上流端まで到達するため、最も影響の大きな交通状況となる。このような交通状況下でも本研究の制御手法は効果を得られる可能性があると考えられる。

表-7 基準速度以下の総走行時間の変化(Step2)

単位: 秒

	60km/h以下	50km/h以下	40km/h以下
制御なし	565	362	237
制御あり	1,247	190	121
差分	682	-172	-116
差分(%)	121%	-48%	-49%

表-8 基準速度以下の渋滞量の変化(Step2)

単位: 秒 × m

	60km/h以下	50km/h以下	40km/h以下
制御なし	45,500	30,200	22,400
制御あり	93,200	14,100	10,800
差分	47,700	-16,100	-11,600
差分(%)	105%	-53%	-52%

表-9 急減速回数の変化(Step2)

	急減速回数
制御なし	569
制御あり	45
差分	-524
差分(%)	-92%

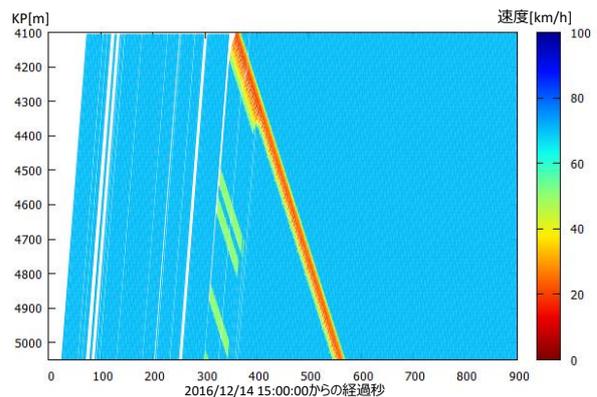


図-11 Step2 (制御なし) における VT 推定結果

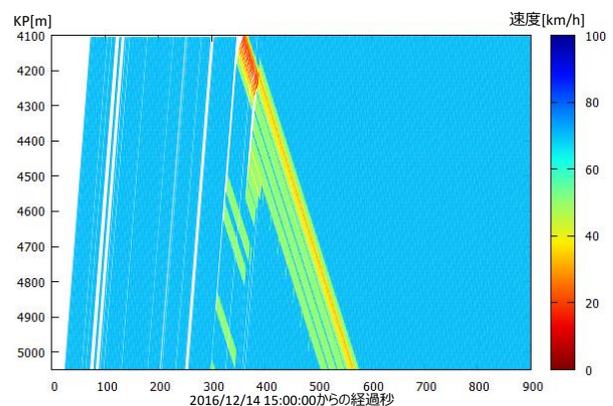


図-12 Step2 (制御あり) における VT 推定結果

6. まとめと今後の課題

(1) 本研究の成果

本研究の成果は以下のとおりである。

- 渋滞発生直前の交通状況に対して、ショックウェーブを回避する形で到着時刻制御を行なう制御手法を提案し、VT を用いてその効果を算出した。
- ショックウェーブの検知にパルスデータの存在時間を用いることで、その検知が可能であることを示した。
- 車両制御により、渋滞発生のリスクがあると考えられる基準速度 50km/h, 40km/h 以下の総走行時間と渋滞量, 急減速の発生回数が減少することを確認し、車両制御が交通状況の改善に繋がると確認した。

(2) 今後の課題

今後の課題は次のとおりである。

- 本研究で想定した制御手法は、渋滞直前に発生するショックウェーブを検知することが最初のステップとなる。その検知を確実にを行うために、パルスデータの存在時間に関する閾値についてさらなる検討が必要と考えられる。
- 本研究では VT による単純な車両挙動を仮定して制御効果を検討した。今後は加減速に伴う車両挙動や追い越しなど、現実的な車両挙動を考慮した上で制御効果が得られるのかについて、ミクロシミュレーション等を用いて詳細に検討する必要があると考えられる。
- 本研究では 2 車線区間の第 2 車線（追越車線）を対象に VT を適用し、制御を行なうことを想定

したが、対象区間には黄線（車線変更不可）区間を含んでいた。同様の VT を用いた枠組みが車線変更可の区間にも適用可能か今後検証が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一: 高速道路サグ部渋滞対策に資する ACC の将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.B_60-B_67, 2015.
- 2) 金澤文彦, 坂井康一, 鈴木一史, 岩崎健: 高速道路サグ部における ACC 車両との路車間連携による交通円滑化, 第 32 回交通工学研究発表会論文集, pp. 31-34, 2012.
- 3) He, Z., Zheng, L., Song, L., and Zhu, N.: A jam-absorption driving strategy for mitigating traffic oscillations, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.18, No.4, pp.802-813, 2017.
- 4) 塩見康博, 兒玉崇, 北澤俊彦, 飛ヶ谷明人, 増本裕幸, 眞貝憲史, 田名部淳: 単路部ボトルネックにおける自動走行車両への介入制御による遅れ時間最小化の可能性, 第 37 回交通工学研究発表会論文集, pp. 487-494, 2017.
- 5) Daganzo, C. F.: A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.39, No.2, pp.187-196, 2005.
- 6) Daganzo, C. F.: A variational formulation of kinematic waves: Solution methods, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.39, No.10, pp.934-950, 2005.
- 7) 川崎洋輔, 原祐輔, 桑原雅夫: 状態空間モデルとプローブ軌跡データを用いた区間途中の流出台数の推定手法の構築, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_1123-I_1132, 2016.
- 8) Mehran, B. and Kuwahara, M.: Fusion of probe and fixed sensor data for short-term traffic prediction in urban signalized arterials, *International Journal of Urban Sciences*, Vol.17, No.2, pp.163-183, 2013.

Investigation of Measures to Congestion Occurrence by Speed Control with Variational Theory

Norihito SHINKAI, Hideyuki SUZUKI, Takashi KODAMA, Ayaka ISHI,
Jun TANABE, Yasuhiro SHIOMI