

追従車両モデルに基づく渋滞の解消 —直線道路における渋滞吸収運転—

M2014SC017 大橋敏裕

指導教員：大石泰章

1 はじめに

交通流における渋滞現象は経済的損失をもたらすだけでなく、停止と発進を繰り返すことにより二酸化炭素排出量が増加するため環境への影響も大きい。そのため、渋滞の原因を解明し、その発生を抑制または解消するための研究として追従車両モデルが提案されてきた [1, 2]。また、文献 [3, 4] によって渋滞が発生しない条件が与えられたことにより、渋滞研究においてシミュレーションの利用が容易となった。文献 [5, 6, 7] ではこの条件を用いて円形交通流における渋滞抑制法を研究しており、各車両にウォッシュアウト制御を用いることで、ドライバーの意図する最適な車間距離と速度が不明であっても安定化が可能であることを示した。しかし、この方法では全車両を制御する必要があり、実際の渋滞対策としては実用的とはいえない。

一部の車両を制御すればよい渋滞解消法として、文献 [8, 9] の渋滞吸収運転の理論が挙げられる。この理論では渋滞解消のための制御を行う車両が渋滞吸収車と呼ばれる車両のみであり、少ない台数で渋滞解消に大きな効果を得られるとされている。高速道路での実験では渋滞吸収車 8 台を用いることで、渋滞が発生し始めた段階での渋滞解消に成功している [10]。また、文献 [11] では円形交通流に対して、[1] で提案された最適速度モデルに基づいた渋滞吸収運転手法を提案している。この手法では交通流の中に渋滞吸収車を一定台数投入することで外部からの交通情報が得られない場合でも渋滞吸収運転が可能であり、渋滞の成長を防ぐことができることが示されている。ただし、直線状の交通流への適用が行われておらず、既に発生している渋滞への効果も未知である。

本研究では、[1, 2] で提案された二つの追従車両モデルに基づき、直線状の道路に発生した渋滞に対して 1 台の車両による渋滞吸収運転で渋滞を解消する方法を検討する。文献 [11] と異なりこの特別な車両は外部からの交通情報を得ることができると仮定する。交通情報を得ることによって、文献 [11] よりも大きな渋滞に対して渋滞吸収運転が行えると考えられる。

2 追従車両モデル

使用する追従車両モデルの検討を行う。図 1 のように、 N 台の車両が一車線の直線上を走行している状況を考える。先頭の車両から後ろへ順に 1 番目、2 番目、…と車両を数えることにし、 $y_i(t)$ は $i-1$ 番目と i 番目の車両の車間距離である。車両の長さは零と考える。また、 $v_i(t)$ は i 番目の車両の速度である。本研究では先頭車両は

$$\dot{v}_1(t) = [V_{\max} - v_1(t)], v_1(0) = 5 \quad (1)$$

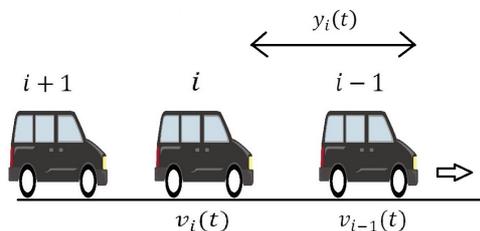


図 1 直線上を走行する車両群

に従って走行するものとする。ここで $V_{\max} = 28[\text{m/s}]$ である。すなわち、先頭車両は最高速度 $V_{\max} = 28[\text{m/s}]$ まで加速し続けるものとする。

2.1 最適速度モデル

文献 [1] で提案された最適速度モデルでは、先頭車両を除く各車両のダイナミクスを

$$\begin{cases} \dot{v}_i(t) = a[F(y_i(t)) - v_i(t)], \\ \dot{y}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

であるとする。 $a > 0$ はドライバーのアクセル・ブレーキ感度であり、 i 番目の車両の速度 $v_i(t)$ が、現在の車間距離 $y_i(t)$ に依存して決まる理想の速度 $F(y_i(t))$ と異なるとき、どの程度の加速または減速をするかの比率を表す。本研究では、全ての車両のアクセル・ブレーキ感度を $a = 1$ とする。 $F(y_i(t))$ は最適速度関数と呼ばれ、

$$F(y_i(t)) = b[\tanh(\frac{y_i - y^*}{c}) + \tanh(\frac{y^*}{c})] \quad (3)$$

で与えられる。 b, c, y^* は正のパラメータである。本研究では $b = 14, c = 7, y^* = 15$ とする。そのときの最適速度関数を図 2 に示す。前車との車間距離が十分に大きいとき、理想の速度は $28[\text{m/s}]$ 程度であるが、車間距離が小さくなるにつれて理想の速度は小さくなり、ついには $0[\text{m/s}]$ となる。

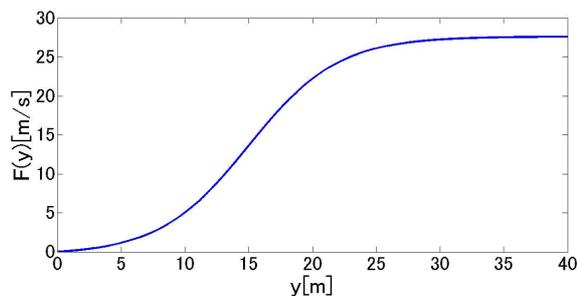


図 2 最適速度関数

2.2 Helly モデル

文献 [2] で提案された Helly モデルでは、先頭車両を除く各車両のダイナミクスを

$$\begin{cases} \dot{v}_i(t) = k_1[y_i(t) - D(v_i(t))] \\ \quad + k_2[v_{i-1}(t) - v_i(t)], \\ \dot{y}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

のように表す。 k_1, k_2, T_{des} は車間距離と速度に対する重みであり、全ての車両で $k_1 = 0.6, k_2 = 0.2, T_{\text{des}} = 0.8, d = 7.5$ であるとする。ここで、文献 [9] より、 $D(v_i(t))$ を式 (5) のようにすることで各車両は自車の速度と速度に応じた車間距離によって加減速を決定する。

$$D(v_i(t)) = d + T_{\text{des}}v_i(t) \quad (5)$$

また、加速度が $0[\text{m/s}^2]$ のときは車間距離 d を維持するため車両の長さを考慮することができる。

2.3 モデルの比較

車両の台数を $N = 300$ としてシミュレーションを行い、渋滞が成長することを確認する。先頭車両を除く各車両の初期の車間距離を $y_i = 15[\text{m}]$ 、速度を $v_i = 5[\text{m/s}]$ としてそれぞれ式 (2), (4) に従って走行させる。全車両が十分に加速した段階で先頭車両が渋滞に巻き込まれたものとして意図的に減速させる。そのときの車両速度の変化を表したものが図 3 である。

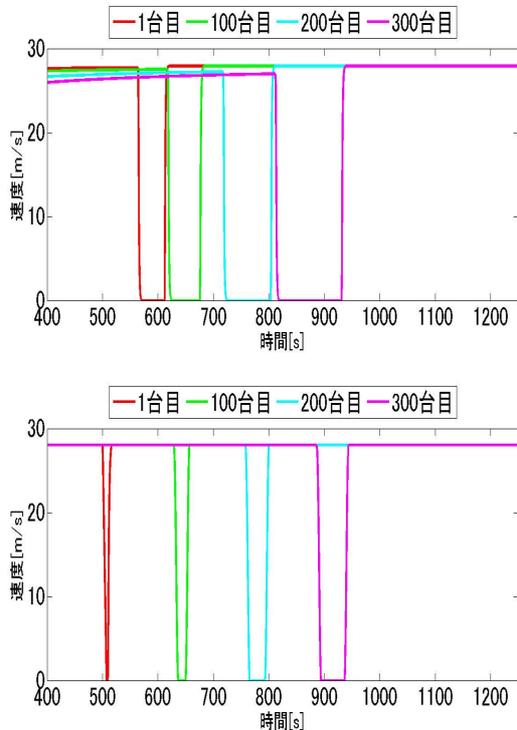


図 3 上図: 最適速度モデルにおける速度変化
下図: Helly モデルにおける速度変化

後方の車両ほど速度 $v_i(t) = 0$ で停止している時間が長くなっていることがわかる。このことから、どちらのシ

ミュレーションでも渋滞が次第に成長することが確認できた。

次に、先頭車両が $50[\text{s}]$ の間だけ $V_{\text{max}} = 28[\text{m/s}]$ から $25[\text{m/s}]$ まで減速した場合を図 4 に表す。最適速度モデルでは先頭車両の減速が後続で増幅されて渋滞に成長しているのに対して、Helly モデルでは車両が後方であるほど減速が小さくなり、40 台目からは減速せず走行できている。現実の交通流では減速が十分に小さいときは渋滞は成長せず縮小していく。そのため、本研究ではより現実の交通流に近いと考えられる Helly モデルに基づいて研究を行う。

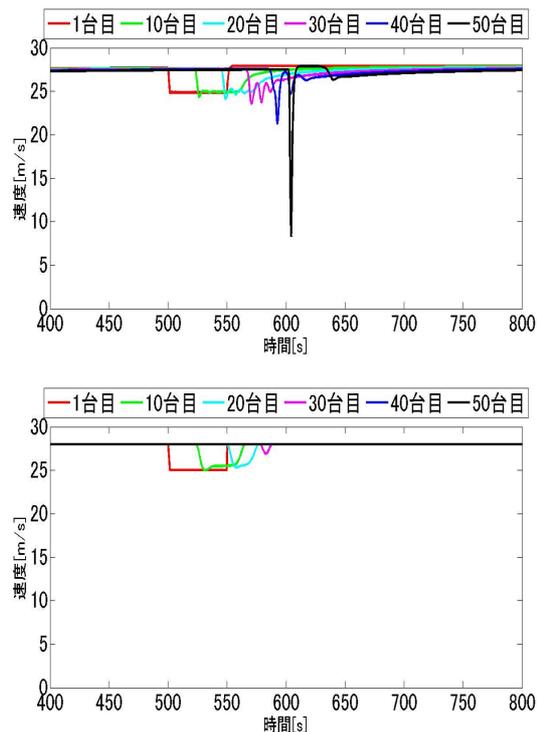


図 4 上図: 最適速度モデルにおける速度変化
下図: Helly モデルにおける速度変化

3 渋滞吸収運転

渋滞吸収運転とは、渋滞を吸収するような特殊な運転法である。本章では Helly モデルの枠組みで渋滞吸収運転を実現する新しい方法を提案する。

3.1 渋滞吸収運転とは

文献 [8] によれば、渋滞吸収運転は slow-in, fast-out の 2 つの走行方法で構成される (図 5)。slow-in では、渋滞吸収車は渋滞に巻き込まれる前に一定速度 v^* まで減速して走行し、前車との車間距離をとりながら走行する。これにより、渋滞への突入を遅らせることで渋滞が成長するのを遅らせる。fast-out では、渋滞に巻き込まれた渋滞吸収車が現在の速度における適切な車間距離よりも詰めて走行する。これにより、後続の車両が渋滞から脱出するのが早まり、渋滞が縮小する。

この 2 つの走行方法を使うことで渋滞が成長する速度

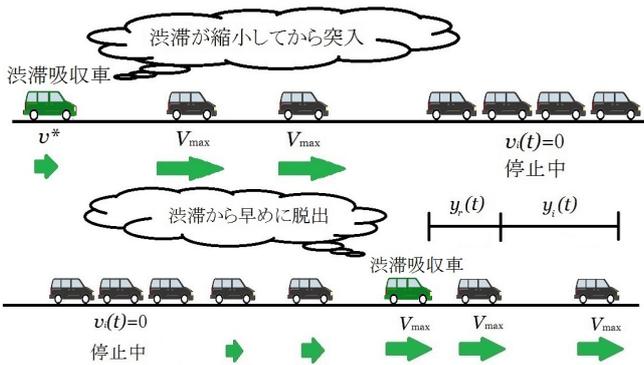


図5 上図: slow-in; 下図: fast-out

よりも縮小する速度の方が速くなり、渋滞が解消される
と期待できる。

3.2 提案手法

渋滞吸収運転において、slow-inの際に用いる速度 v^* が大きいと渋滞解消前に渋滞吸収車が渋滞に突入してしまい、十分な効果が得られない。また、 v^* が小さいと渋滞吸収車の減速によって二次渋滞が発生する。二次渋滞とは、渋滞吸収運転を行う際の減速によって発生する渋滞のことであり、この発生を防ぐため v^* を適切に選ぶ必要がある。

シミュレーションを用いて渋滞解消が可能か否か、を渋滞吸収運転中の速度 v^* と渋滞吸収車が先頭から数えて何台目に位置するかによって渋滞解消の成否を表したものが図6である。図の青い範囲が渋滞吸収運転によって渋滞解消が可能な値を表しており、この範囲に収まるように図6の緑線のような関数を作成する。具体的には、 v^* は次のような関数である：

$$v^* = a_1 \tanh\left(\frac{r-b}{c}\right) + a_2 \log\left(\frac{r}{c}\right) + v_l. \quad (6)$$

ただし、 $a_1 = 1.8$, $a_2 = 0.27$, $b = 40$, $c = 50$, $v_l = 22.4$ である。渋滞吸収車を r 台目とすると渋滞吸収運転中の

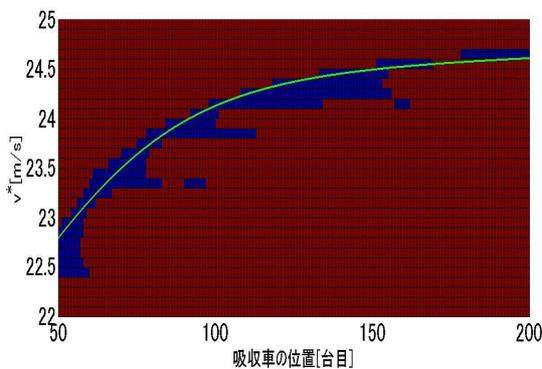


図6 速度関数

渋滞吸収車の速度 v_r は

$$\dot{v}_r(t) = k_3(v^* - v_r(t)), k_3 = 0.1 \quad (7)$$

で定まるものとする。すなわち、渋滞吸収運転中は式(6)が与える速度 v^* を目標として走行する。渋滞吸収車は先頭車両が17[m/s]未満の速度になったとき渋滞吸収運転を行うものとし、それ以外のときは通常の運転を行うものとする。また、渋滞吸収車の前車の速度 v_{r-1} が22[m/s]まで加速したとき、渋滞から脱出したと判断して渋滞吸収運転を終了し、通常の運転に戻る。これが、本研究で提案する渋滞吸収運転の方法である。

4 シミュレーションと考察

4.1 シミュレーション結果

3.2節で提案した渋滞吸収運転法に従ってシミュレーションを行う。2.2節の車両の台数を $N = 600$ として先頭から r 番目を渋滞吸収車とする。図7, 8, 9, 10はそれぞれ

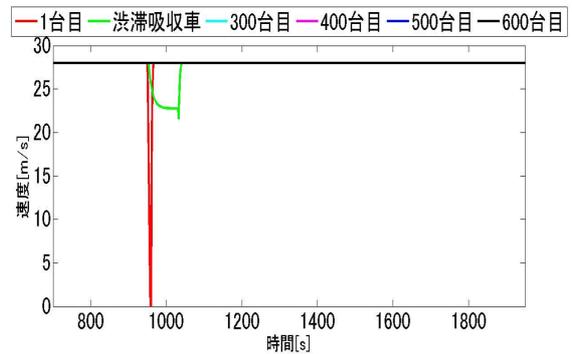


図7 $r = 50$ のときの速度変化

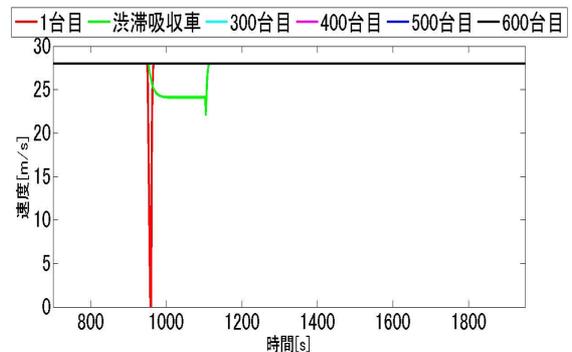


図8 $r = 100$ のときの速度変化

れ、 $r = 50$, $r = 100$, $r = 150$, $r = 200$ のときの車両速度の変化のグラフである。全てのグラフで渋滞吸収車は先頭車両が減速してから速度 v^* で走行しており、渋滞吸収車は停止せずに走行できている。すなわち、渋滞に巻き込まれることなく走行ができていることがわかる。また、渋滞吸収車が減速したことによる渋滞も最後尾に到達する前に解消されているため、この提案手法による二次渋滞は発生しない。 $r = 200$ のとき、渋滞吸収車の存在によってどのような効果が得られたかを図11に示す。200台目以降では平均速度が上昇しており、渋滞吸収車による効果が確認できた。

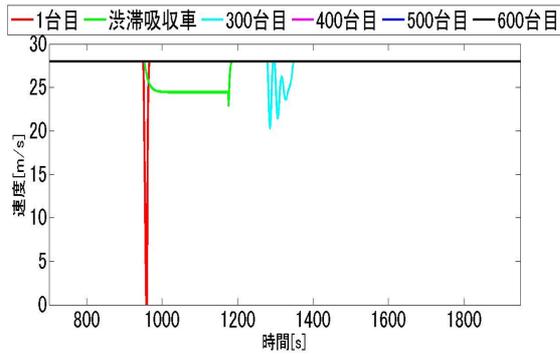


図 9 $r = 150$ のときの速度変化

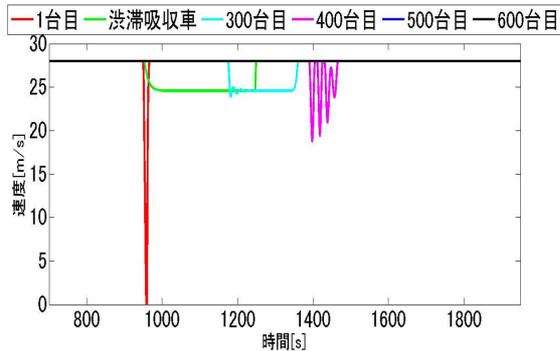


図 10 $r = 200$ のときの速度変化

4.2 考察

3.2 節で渋滞吸収車の目標速度 v^* を r の関数として求めるとき、本研究では計算機のメモリの制約の問題から r の範囲を 50 から 200 に設定した。また、先頭車両の停止時間も一定としてある。そのため、停止時間の変更やこの範囲外での渋滞吸収車の配置を行う場合、速度関数で用いられているパラメータの見直しを行う必要がある。

図 6 では $r = 169 \sim 178$ で渋滞解消が可能な範囲が途切れている。しかし、シミュレーションでの速度の刻み幅を細かくすると渋滞解消が可能な範囲が存在することが確認できた。このように目標速度 v^* の設定は微妙で注意が必要である。

5 おわりに

本研究では、直線状の道路に発生した渋滞に対して交通情報が得られると仮定し、1 台の車両による渋滞吸収運転法を提案した。その結果、速度関数の適用によって目標速度を定めることで後続車両の速度の改善に成功した。

本研究では渋滞吸収車の目標速度を渋滞車の位置の関数として実験的に求めた。しかし、目標速度は先頭車両の停止時間にも依存するため、この依存性を利用することで本研究で行ったような総当たりの解析を行うことなく目標速度を求める関数の作成が行える可能性がある。この方向の研究は今後の課題である。

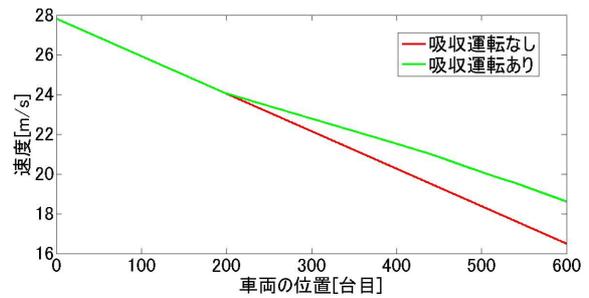


図 11 $r = 200$ の場合の各車両の平均速度

参考文献

- [1] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, vol. 51, no. 2, pp. 1035–1042 (1995).
- [2] W. Helly: Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow. *Theory of Traffic Flow*, Research Laboratories, General motors, pp. 207–238 (1959).
- [3] 小西啓治・小亀英己・平田健太郎:「最適速度関数を有する離散時間交通流モデルの解析と制御」. 電子情報通信学会技術研究報告予稿集, NLP98-130 (1999).
- [4] 小西啓治・小亀英己・平田健太郎:「最適速度交通流モデルに生じる渋滞現象とその抑制」. 電子情報通信学会技術研究報告予稿集, NLP99-133 (2000).
- [5] H. Sakaguchi and S. Yamamoto: Driver centric decentralized controller design in traffic flow. *Proceedings of the ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, August 2009, Fukuoka, pp. 246–250.
- [6] 坂口英嗣・山本茂:「ウォッシュアウト制御によるサイクリックな交通流の渋滞抑制」. 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会予稿集 (2011).
- [7] 大橋敏裕:「渋滞の抑制制御における制御則のロバスト性」. 南山大学情報理工学部 2013 年度卒業論文.
- [8] R. Nishi, A. Tomoeda, K. Shimura, and K. Nishinari: Theory of jam-absorption driving. *Transportation Research Part B*, vol. 50, pp. 116–129 (2013).
- [9] 谷口洋平・西遼佑・江崎貴裕・西成活裕:「追従モデルを用いた渋滞吸収運転の数値シミュレーション」. 第 10 回日本応用数理学会研究部会連合発表会予稿集 (2014).
- [10] 友枝明保:「渋滞解消への数理と実証」. 道路, vol. 847, pp. 12–17 (2011).
- [11] 江上一樹:「渋滞吸収車両による交通渋滞の解消」. 南山大学大学院理工学研究科 2014 年度修士論文.