

渋滞吸収車両による交通渋滞の解消

M2013SC004 江上一樹

指導教員：大石泰章

1 はじめに

交通渋滞は、遅延による時間の損失、交通事故の誘発、エネルギーロスなど様々な悪影響をもたらしている。特に、渋滞による損失時間は年間国民1人当たり約30時間にのぼる [1]。高速道路での渋滞発生箇所は、上り坂およびサグ（下り坂から上り坂にさしかかる凹部）部、接続道路からの渋滞、インターチェンジ合流部の順に多い [2]。上り坂およびサグ部で起こる渋滞の多くは自然渋滞と呼ばれる現象である。自然渋滞は、交通流において、複数の車両が重なって走行する際、前方の車両が行った減速が後方に伝播するにつれ増幅し、後方になればなるほど低速走行もしくは停止せざるをえなくなるために起こる現象である。

近年では、渋滞現象を解明し、そのモデルを表す手法が提案されてきた [3]。また、解決策として、個々に走行する車両の速度を制御することで渋滞を防ぐ研究がされている [4, 5]。しかし、この手法では走行する全ての車両に制御が必要になっている。

自然渋滞に対して西成活裕が提唱する「渋滞吸収運転」が有効なことが社会実験により実証されている [6, 7]。「渋滞吸収運転」は、一部の車両が特別な振る舞いを行うことで、交通流全体を改善するというものである。通常、交通渋滞は後続車がなければ減少していく。しかし、渋滞から抜けていく台数よりも多くの車両が渋滞に到着する場合は渋滞は増加していく。したがって、渋滞に加わる車両の台数を前方から抜けていく台数よりも少なくすれば渋滞を短くすることができる。渋滞吸収運転は、前方の渋滞に対して早めに減速し、渋滞への到着を遅らせることで自車が渋滞に巻き込まれることを防ぎ、渋滞の成長を防ぐという走法である。この「渋滞吸収運転」は、高速道路での交通流量と交通密度に関する調査から、交通流が自由流から渋滞流へと変わる臨界密度を調査することで得られた方法である。具体的には、高速道路において「車間距離 40m、時速 70km を維持し渋滞の十分手前から走行する」というものである。しかし、この方法は渋滞の解消を行う交通流を事前に調査し、渋滞を改善できる走行速度と車間距離を算出する必要がある。

近年では、カメラやレーダなどの車載センサの発展により車両は、周囲の状況を正確に把握できるようになった。また、GPS(Global Positioning System) や ITS(Intelligent Transport System) などのインフラ整備によって交通情報も正確かつ瞬時に取得できるようになった。本研究では、得られる情報を基に、事前に調査された交通流以外に対しても、一部の車両を制御することで渋滞を改善する手法の設計を目指す。本研究で提案する手法は、自車とその前方の車両との間の距離、および自車の速度から、渋滞を改善する渋滞吸収車両の振る舞いを求め、交通流を一定の速度で流れるようにするもので

ある。加えて「渋滞吸収運転」で用いられた方法を活かし、発生している渋滞を解消することも考える。具体的には前方の車両の状況に合わせて、減速・加速を行うモデルをそれぞれ設計しそれらを上手く使い分けることを考える。

2 最適速度モデル

2.1 最適速度関数

本研究では文献 [5] で示された方法に従い、車両をモデル化する。交通流の中での車両の振る舞いは最適速度モデル (Optimal velocity model) というモデルで表現する。

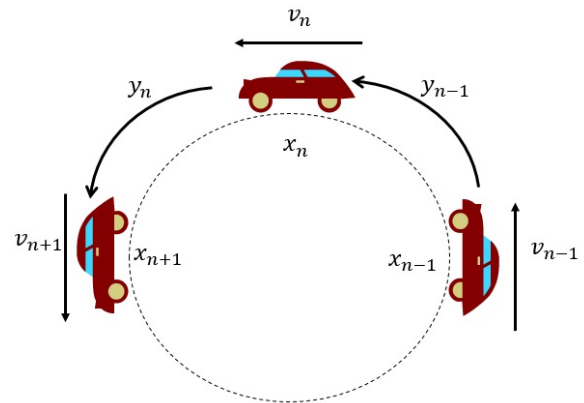


図 1 最適速度モデル

図 1 は複数の車両が円周型のサーキットを走行している状態である。後方の車両から順に番号づけしてこれを n と書くが、ここでは簡単のため省略する。このモデルでは、 v をある車両の速度、 y を前方車両との間の車間距離とすると、車両の振る舞いは

$$\dot{v}(t) = a(F(y(t)) - v(t)) \quad (1)$$

で記述される。

ただし、 $F(y(t))$ は、最適速度関数であり、 b と c を正の定数として、

$$F(y(t)) = b\{\tanh(y(t) - c) + \tanh c\} \quad (2)$$

で表される。この関数は、車間距離 y が 0 のときに 0 となり、 y が増加するにつれて大きくなるが一定の値で飽和する (図 2)。これは、車間距離が小さいときにはゆっくり走り、車間距離が大きときには速く走りたいというドライバーが理想とする速度を表している。

式 (1) は、右辺で理想速度と実際の車両の速度との差を考え、この差に応じて理想速度に近づくよう加減速を行うことを表している。 a は、感応度を表す正の定数であ

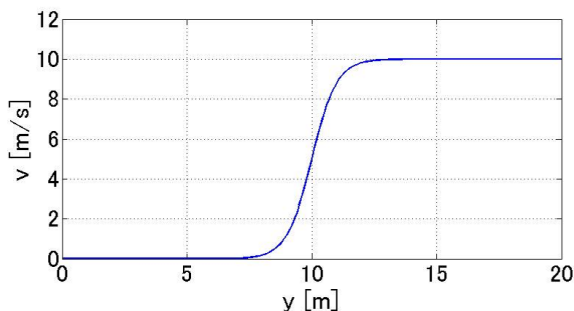


図 2 最適速度関数の例 : $b = 5$, $c = 10$ の場合

り, a が大きいほど反応が早いことを意味している. また, Bando et al. によって交通流の安定性の解析が行われ,

$$\dot{F}(y) < \frac{a}{2} \quad (3)$$

となるとき交通流は不安定になるとされている [3, 8].

2.2 自然渋滞のシミュレーション

最適速度モデルを用いて数値シミュレーションを行い自然渋滞発生の検証を行う. 車両の最適速度モデルのパラメータは, $b = 5$, $c = 10$ に設定する. 時刻 $t = 0$ に 20 台の車両を 1 周 200m の円周型のサーキットに等間隔に配置し, 同一速度 5(m/s) で走行しているとし, それ以降はすべての車両が式 (1) に従って走行するものとする. 初期状態の位置に 0 以上 0.1 以下の範囲に分布する一様乱数を擾乱として全ての車両に加える. なお, シミュレーションはサンプル時間を 0.02 秒として 4 次ルンゲ・クッタアルゴリズムを用いて行う.

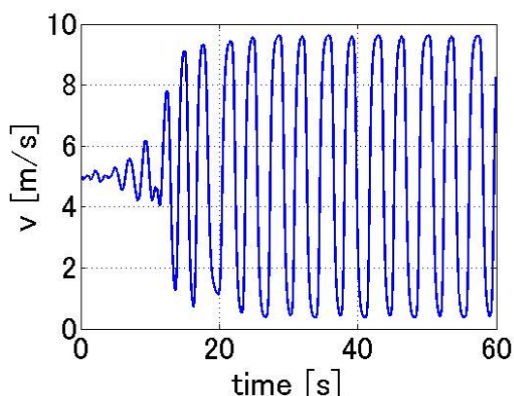


図 3 $a = 5$ の場合のシミュレーション結果

図 3 は, $\dot{F}(y) < \frac{a}{2}$ となるように $a = 5$ としたときのシミュレーション結果である. 最初は小さかった加減速が増幅し, 振動的な振る舞いになったことが確認できる. これは渋滞の発生を意味する.

図 4 は, $\dot{F}(y) > \frac{a}{2}$ となるように $a = 15$ まで感度を上げたときのシミュレーション結果である. 最初は擾乱に

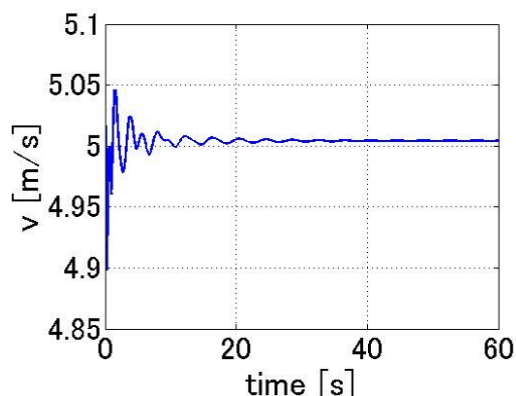


図 4 $a = 15$ の場合のシミュレーション結果

よる速度の振動が起こるもののすぐに一定速度に回復している.

3 渋滞吸収車両の設計

3.1 設計手法

2 章でシミュレーションを行った交通流に対して, 渋滞の解消を行う車両, すなわち渋滞吸収車両の設計を行う. まず以下の, 2 つの走行モデルを考える: 前方の車両が減速している場合に他の車両に比べ早い段階で緩やかに減速を始めるモデル (減速モデル), および速度が低下した状態から, 前方の車両の速度に追従するように加速を始めるモデル (加速モデル). この 2 つのモデルを前方の車両の状況に合わせて使い分ける.

3.2 減速モデルの設計

交通渋滞を改善するためには, 渋滞に差し掛かる手前で早めに減速することで渋滞に進入するタイミングを遅らせることが必要である. この場合, もし渋滞の最後尾に到達する前に渋滞が解消されていれば停止することなく速度を維持したまま通過できる. しかし, 大きな減速を短時間で行うと, 減速は増幅されて後方の車両に伝わってしまうため, 緩やかに減速する必要がある. そこで以下のような加速度 u で減速する. 渋滞の最後尾の車両の速度を V^* , 最後尾への到着にかかる時間を T^* とすると, 渋滞吸収車両の速度 v は T^* だけ時間がすぎた後に V^* になっていることが望ましいので,

$$V^* = v + uT^* \quad (4)$$

また, 渋滞の最後尾までの距離を L とすると,

$$L = vT^* + \frac{1}{2}uT^{*2} \quad (5)$$

であることが望ましい. 以上から求める加速度は,

$$u = \frac{1}{2L}(V^{*2} - v^2) \quad (6)$$

である. v , V^* , L は渋滞の最後尾は時々刻々と変化するので, 一定周期ごとに加速度 u を求める.

3.3 加速モデルの設計

渋滞から抜け加速を行う際のモデルは、すばやく前方の車両に追従することが求められる。しかし、単純に大きな加速度で加速するだけでなく前方の車両との車間距離を安全に確保しなければならない。安全のために確保する車間距離を y^* とし、 d を正の定数として、

$$y^* = dv^* \quad (7)$$

のように前方車両の速度 v^* に比例するものとする。渋滞吸収車両の速度 v が t^* だけ時間がすぎた後に前方車両の速度 v^* になるには、

$$v^* = v + ut^* \quad (8)$$

であればよい。追従する前方車両までの距離を l とすると車間距離 y^* を確保しつつ速度 v^* になるには、

$$l - y^* = vt^* + \frac{1}{2}ut^{*2} \quad (9)$$

であることが望ましい。以上から求める加速度は、

$$u = \frac{1}{2(l - dv^*)}(v^{*2} - v^2) \quad (10)$$

となる。 d はあらかじめ定めておき、 l 、 v^* 、 v は一定周期ごとに策定して加速度 u を更新するものとする。

3.4 吸収車両の実装

加速モデルと減速モデルの切り替えは、前方車両群の速度を基準に行う。渋滞吸収車両は前方の車両群の速度を観測できるものとする。直前の車両から1台ずつ前方の車両へ速度を参照していき、渋滞吸収車両よりも速度が低い車両を探知した場合は、その車両を渋滞の最後尾とみなし減速モデルに切り替える。また、前方の車両群全ての速度が渋滞吸収車両の速度以上に回復した場合は加速モデルに切り替える。ただし、 $l \leq y^*$ の場合には加速を行わない。

4 数値実験

2章の図3と同様の条件でシミュレーションを行った。ただし、 $n = 1$ 、 $n = 11$ の車両を渋滞吸収車両とした。それぞれの渋滞吸収車両は前方9台の車両の速度を観測できるものとする。図5は、このように渋滞吸収車両を導入した場合の $n = 1$ の車両の速度のグラフである。

図3にみるように渋滞吸収車両を入れない場合のシミュレーションでは、車両の振る舞いが振動的になり、最低速度は停止に近い速度になっていた。一方で、渋滞吸収車両を導入した場合には、図5に見るように速度が4.93(m/s)で安定した。これにより、2台の渋滞吸収車両により自然渋滞の発生を抑制することが検証できた。

渋滞吸収車両ではない $n = 5$ の車両の速度のグラフが図6である。 $n = 5$ の車両は渋滞吸収車両ではないが、 $n = 1$ の車両と同様に速度は4.93(m/s)で安定し、停止することなく走行し続けることができた。

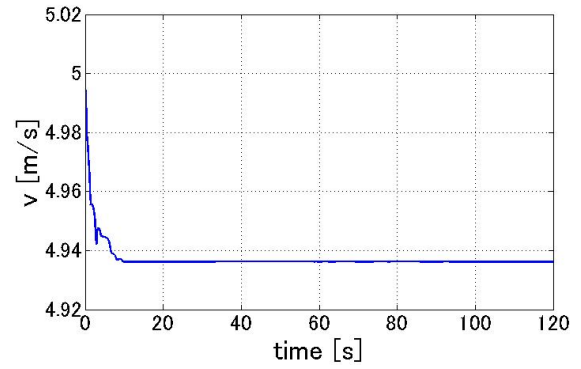


図5 $n = 1$ の車両の速度

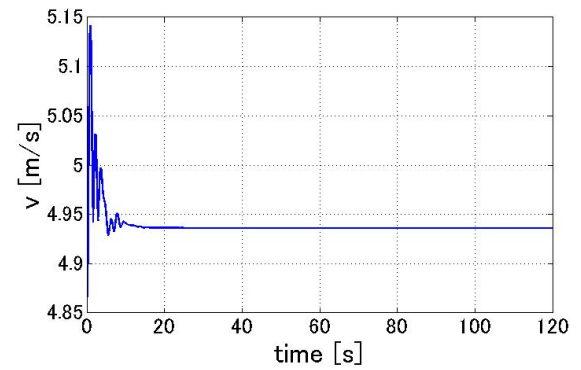


図6 $n = 5$ の車両の速度

5 ロバスト性の検証

5.1 パラメータ誤差に対するロバスト性

設計した渋滞吸収車両のロバスト性を検証するために、渋滞吸収車両ではない車両のパラメータにばらつきを与えた。 $4.5 < a < 5.5$ 、 $4.95 < b < 5.05$ 、 $9.5 < c < 10.5$ の範囲でランダムで設定した。4章と同様に $n = 1$ 、 $n = 11$ の車両を渋滞吸収車両とした。

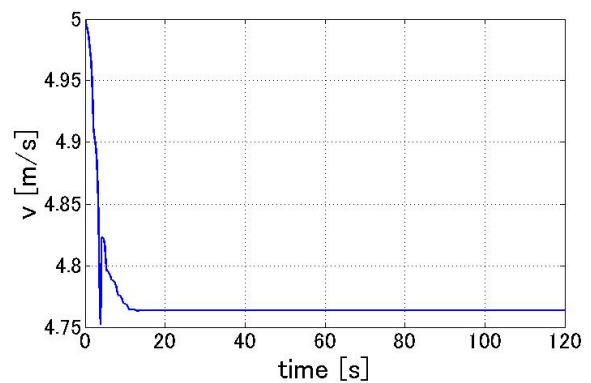


図7 $n = 1$ の車両の速度

図7は、渋滞吸収車両である $n = 1$ の車両の速度のグラフである。4章の結果と比較して速度は4.76(m/s)に低

下したが、速度は一定に安定し自然渋滞の発生を抑制することができた。図8は、渋滞吸収車両ではない $n = 5$ の車両の速度のグラフである。4章の結果と比較して速度が低下した要因は、与えたパラメータの誤差があるから他の車両に比べ車間距離に対して目標速度が小さい車両だと考えられる。

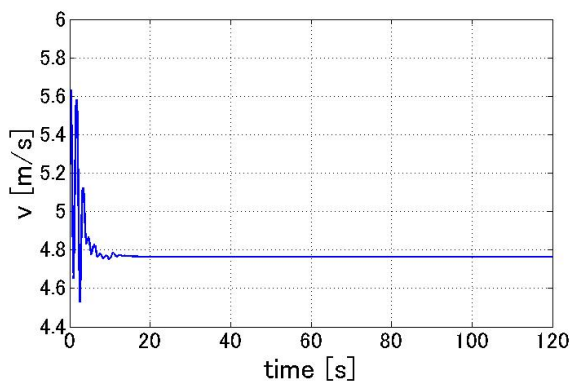


図8 $n = 5$ の車両の速度

5.2 外乱に対するロバスト性

4章のシミュレーションに外乱を加えるシミュレーションを行った。外乱として60秒時点で $n = 5$ の車両が1秒間減速を行う。外乱を加える $n = 5$ の車両の速度のグラフが図9である。

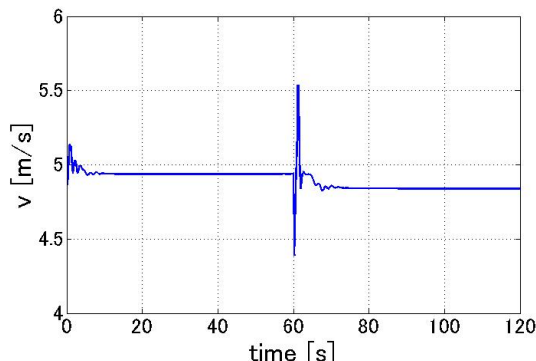


図9 $n = 5$ の車両の速度

渋滞吸収車両である $n = 1$ の車両の速度のグラフが図10である。前方の減速を観測し、他の車両より早い段階で減速を始めたことで減速幅を少なくしていることが確認できる。しかし、外乱を加える前は4章の結果同様に $4.93(\text{m/s})$ で安定していたが、外乱を加えた後には $4.83(\text{m/s})$ に速度が低下した。

6 おわりに

本稿では、渋滞吸収運転の考えを基に減速モデルと加速モデルを使い分ける渋滞吸収車両を設計することで自然渋滞発生の抑制を試みた。今回の数値実験から、一部の車両を制御することで自然渋滞の発生を抑制することができた。また、パラメータの誤差や外乱に対しても強

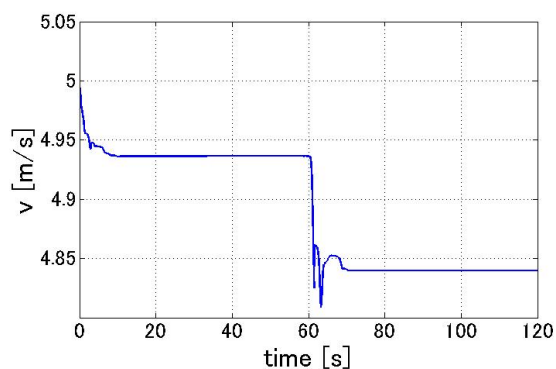


図10 $n = 1$ の車両の速度

いことが検証できた。しかし、外乱に対するロバスト性の検証において、外乱が加わった後に速度は低下したため加速モデルについてもより考察が必要である。今後の課題として、今回は簡易なモデルで数値実験を行ったが、実際の交通流に近い速度モデルを使い効果の検証が必要となる。加えて、円周型のサーキットで発生する自然渋滞ではなく、直線状の道路であらかじめ発生している大きな渋滞など現実に近い問題への応用も課題である。

参考文献

- [1] 国土交通省: 渋滞の現状と施策体系, <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tadm/Top03-01-01.html>.
- [2] NEXCO 東日本: 交通集中渋滞の発生メカニズム, <http://www.enexco.co.jp/activity/safety/mechanism.html>.
- [3] 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.
- [4] 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その制御」, 電子情報通信学会信学技報, NLP98–130, 1999.
- [5] 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.
- [6] 友枝明保・西成活裕: 「渋滞学の新潮流」, システム/制御/情報, Vol. 58, No. 10, pp. 523–529, 2012.
- [7] 友枝明保: 「渋滞解消への数理と実証」, 道路, Vol. 847, pp. 12–17, 2011.
- [8] 松村将邦・長谷隆: 「交通渋滞の線形安定性とシミュレーション」. 日本機械学会論文集, Vol. 65, No. 633, pp. 95–102, 1999.