

速度制御によるボトルネックの交通流量改善

山本大樹¹, 西成活裕²

¹ 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

² 東京大学 先端科学技術研究センター

概要

道路上を移動中の自動車が遠くにある信号等のボトルネックの状態に応じて速度や車間を調節することはあまり行わない。しかし、そのためにボトルネック付近での渋滞が悪化し、交通流量が下がる要因になっている。本研究では、スロースタートルールを導入した totally asymmetric simple exclusion process(TASEP) の改良モデル (“Controlled TASEP”) を分析することで流量改善の手法を探索した。数値シミュレーションを行うことで、ボトルネックの状態に応じた速度制御によって実際に流量が改善されることを示すことができた。

Improvement of traffic flow at a bottleneck by velocity control

Hiroki Yamamoto¹, Katsuhiro Nishinari²

¹ Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo

² Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Abstract

In a one-lane road, the velocity of each vehicle is not influenced by the state of the bottleneck far from them. However, in actual situations, that behavior can deteriorate a traffic jam at the bottleneck and reduce the road capacity. In order to address this problem, we propose an effective way of controlling the velocity of traveling particles according to the state of the bottleneck by analyzing a modified totally asymmetric simple exclusion process (TASEP) model with a slow-to-start (SIS) rule, which we refer to as Controlled TASEP in the paper. By conducting numerical simulations and approximate mathematical analyses, we indicate that the flow can be improved by our control.

1 はじめに

道路上のボトルネック（信号や路線縮小等）は渋滞の主要な原因となっており、ボトルネックにおける交通流の改善は非常に重要である。実際にはラウンドアバウトの導入や路線拡張などによりボトルネックを解消する対策も行われているが、莫大なお金がかかるだけでなくむしろ道路状況を悪化させてしまうことさえある。

一方で、近年ボトルネックを除去するのではなく、ボトルネックでの渋滞を緩和し、流量を改善するた

めの多くの交通マネジメント手法が TASEP を用いて研究されてきている。例えば Woelki[1] の研究では、TASEP において、格子内の粒子の密度によって流入確率を変化させ、格子内の流量を改善する方法が提案されている。一方で、粒子のホップ確率は常に一定値として固定されている。本研究ではこの部分を変更し、改変した TASEP(Controlled TASEP) を分析することで、「ホップ確率をボトルネックの状態によって変化させる」という新たな制御方法を提案している。

2 モデル

Controlled TASEP は L 個のサイトから成る一車線の格子 (図 1) で、各サイトには 1 つの粒子しか入れない。粒子は確率 α で流入し、左ら右へ確率 v でホップしていく。右端に到着すると確率 β で退出する。本モデルでは β を以下のように設定した (ex. 信号の赤と青の切り替え)。

$$\beta = \beta(t) = \begin{cases} 1 & (nT \leq t < nT + \tau) \\ 0 & (nT + \tau \leq t < (n+1)T) \end{cases}$$

ただし、 n は任意の自然数、 T ($T \in \mathbf{R}$) は一周期の長さ、 τ ($0 \leq \tau \leq T$) は出口開放時間である。ここで、 β の時間平均として $\beta^* = \tau/T$ を定義する。また、全ての粒子は慣性の効果を取り入れたスロースタートルール (SIS) ルールに従っており、粒子は一度停止した場合、前が空いても 1 時間ステップ待たなければならない [2]。さらに、全ての粒子は「ボトルネックの状態 (つまり β の値) によってホップ確率 v を変化させる」という制御ルールに従っている。具体的には、 $\beta = 1$ の時は $v = 1$ であるのに対し、 $\beta = 0$ の時は $v = p$ ($0 < p \leq 1$) と設定される。実際上は、この制御は渋滞吸収運転 [3] とも解釈することができる。これらのルールから、時刻 $t+1$ におけるある粒子のホップ確率はその時刻における β の値と、時刻 t と $t-1$ でのその粒子の状態によって決定されることが分かる (図 2)。最後に、パラメータ l を制御の出口からの有効区間の長さとして導入した (図 1)。 $l = L$ の場合は全区間で制御が実施されるのに対し、 $l = 0$ の場合は制御が全くない状態を表していることに留意されたい。

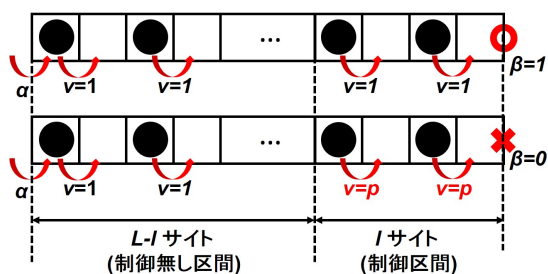


図 1: Controlled TASEP の模式図。上の図は出口開放時 ($\beta = 1$) の様子 (一般的な TASEP と同じ)、下の図は出口閉鎖時 ($\beta = 0$) の様子を示している。

時刻	$t-1$	t	$t+1$
ある粒子の状態 または そのホップ確率	blocked	unblocked	$v = 0$
	(un)blocked	blocked	$v = 0$
	unblocked	unblocked	$v = \begin{cases} 1 & (\beta=1) \\ p & (\beta=0) \end{cases}$

図 2: 粒子のホップ確率の説明図。粒子のホップ確率は SIS ルールと導入した制御ルールに影響される。“blocked” とは着目した粒子の右隣のサイトが他の粒子によって占有されている状態 (“unblocked” は右隣のサイトに粒子が存在しない状態) を示している。

3 シミュレーション結果

次に、上記のモデルを用いてモンテカルロシミュレーションを実行した。具体的にはパラメーター α , p , T , l を変化させ、 $t = 10^6$ (システムが定常状態に達したあと) から $t = 2 \times 10^6$ の間の平均出口流量 $Q(p)$ (1 ステップあたりに左端から外に出る粒子の平均粒子数、 p の関数) を観測した。本シミュレーションの主目的は $Q(p)$ が上述の制御によってどのように改善するかについて調べることである。なお、特に指示がない場合、以下のシミュレーションにおいて、パラメーター L , β^* はそれぞれ $L = 200$, $\beta^* = 0.6$ に固定した。

3.1 制御無し ($p = 1$) の場合の相図

始めに制御無し ($p = 1$) の場合における本モデルの相図を求める (図 4)。図 4 から、相図は低密度領域 (LD) と高密度領域 (HD) の 2 つの領域に別れることがわかる。まず、HD 領域では、粒子は出口において立束する。このケースでは出口付近で常に渋滞が存在しているため、格子から脱出しようとする粒子は必ず SIS ルールの影響を受けることから、 $\beta = 1$ の期間において出口から平均的に 3 時間ステップに 1 つの粒子が脱出する (SIS ルールがない場合は 2 時間ステップに 1 つの粒子が脱出できる)。従って、 $Q(p = 1) = \tau/3 = \beta^*T/3$ で与えられる。一方で、LD 領域においては、粒子は入口において立束するため、普通の TASEP と同様に $Q(p = 1) = \alpha/(1+\alpha)$ [4] で与えられる。最後に、LD と HD の境界線はそれぞれの流量が等しくなる条件を考えると、 $\beta^* = \alpha/3(1+\alpha)$ で表されることがわかる。

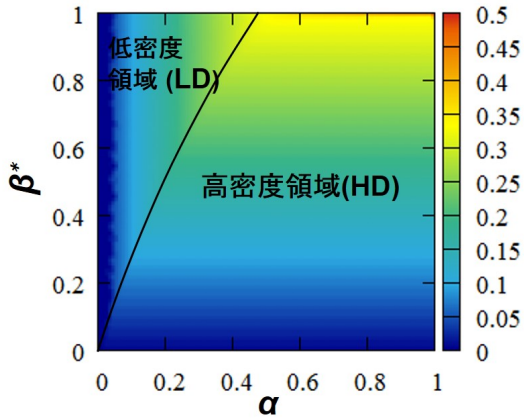


図3: 制御無しの場合の本モデルの相図。色領域は $Q(p=1)$ の値を表している。

3.2 制御による Q の改善

本節では、制御による $Q(p)$ の改善 (または悪化) について調べていく。ここで、新たな指標として流量変化割合 $x[\%]$ を以下のように定義する ($Q(p)$ の値が α と β^* によって変化するため比較しにくい)。

$$x[\%] = \frac{Q(p) - Q(p=1)}{Q(p=1)} \times 100$$

上の定義から、 $x > 0$ の場合は制御によって流量が改善している (制御が有用である) ことを示す一方、 $x < 0$ の場合は制御によって流量が悪化している (制御が逆効果である) ことを示していることが分かる。

始めに、いくつかの $\alpha \in (0.2, 0.4, 1)$ に対して、 p を動かした場合に x がどう変化するかについて調べた (図4)。ここで、前節での考察から、 $\alpha < \beta^*/(3-\beta^*)$ ($\alpha > \beta^*/(3-\beta^*)$) の場合は LD (HD) となるので、 $(\alpha, \beta) = (0.2, 0.6), (0.4, 0.6), (1, 0.6)$ の組み合わせはそれぞれ LD ($Q(p=1) = 1/6$)、HD ($Q(p=1) = 0.2$)、HD ($Q(p=1) = 0.2$) に対応していることに留意されたい。

図4から、 $\alpha = 0.2$ (LD) の場合は x が $p=1$ の場合に最大 ($x=0$) となっており、 $p < 1$ の場合は常に $x < 0$ なので、制御が流量を悪化させている、すなわち逆効果であることがわかる。一方で、 $\alpha = 0.4, 1$ (HD) の場合は $x > 0$ となる部分が存在するため、制御が流量を改善させていることが観測できる。また、 x を最大化する p が $0 < p < 1$ に存在しているが、これは p が小さくなりすぎると粒子間のギャップが必要以上に大きくなりすぎるために逆に流量が

低下することに起因している。さらに、 α が大きくなるほうが x が大きくなっているが、混雑の度合いがより大きいほうが制御効果が大きくなることを示していると考えられる。

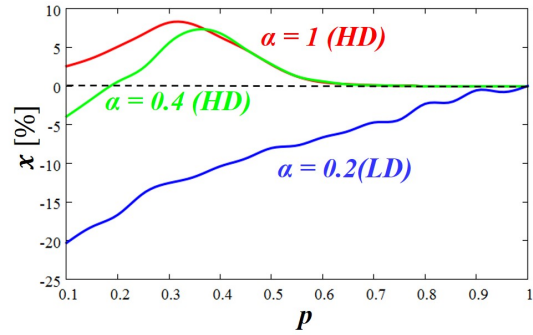


図4: p を変化させた時の $x[\%]$ の変化のグラフ。ここでは $T = 20$ 、 $\alpha \in (0.2, 0.4, 1)$ 、 $l = 200$ としている。

次に、いくつかの $T \in (10, 20, 40)$ に対して、 p を動かした場合に x がどう変化するかについて調べた (図5)。ここで、いずれの場合も $\beta^* = 0.6$ であり、出口開放 (閉鎖) 時間の1周期に占める割合は等しいことに留意されたい。

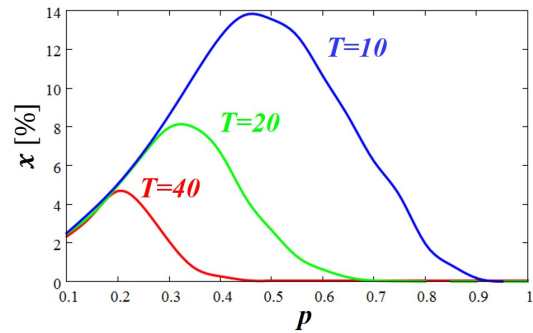


図5: p を変化させた時の $x[\%]$ の変化のグラフ。ここでは $T \in (10, 20, 40)$ 、 $\alpha = 1$ 、 $l = 200$ としている。

図5から、2つのことが観測される。まず、 T が大きくなるに従って x の最大値が小さくなっていることが分かる。これは、連続した出口の閉鎖時間 $((1-\beta^*)T)$ が長い場合のほうが粒子が出口において蓄積しやすいため、制御効果が小さくなることに起因する。また、最大の x を実現する p の値 (p_{opt})

が、 T が大きくなるに従って小さくなっていることが分かる。これも連続して出口の閉鎖時間が長い場合のほうが粒子が出口において蓄積しやすいため、より小さい p によって大きな車間をとることにより出口における粒子の蓄積を防ぐ必要がでてくるためである。

3.3 最適制御区間

本節では、 l を変化させた時に a がどのように変化するかについて調べた (図6)。ここで、各 T に対する p として、前節のシミュレーションで得られた p_{opt} を用いている ($T = 10 : p = 0.35$, $T = 20 : p = 0.21$, $T = 40 : p = 0.21$)。図6から、いずれの場合も a を

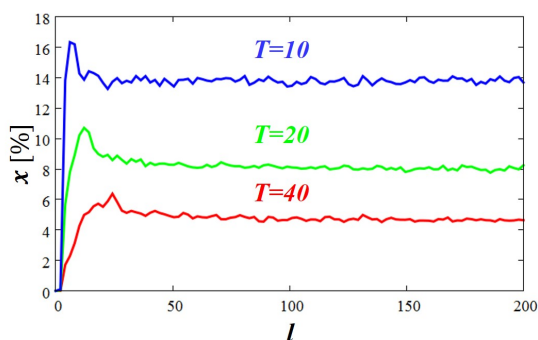


図6: l を変化させた時の x [%] の変化のグラフ。ここでは $T \in (10, 20, 40)$, $\alpha = 1$, $p = p_{opt}$ としている。

最大化する l (l_{opt}) が $0 < l < L$ に存在していることが観測できる。これらの結果から、 l_{opt} は以下の式を満たすと予想できる。

$$l_{opt} = \beta^* T$$

次に、 T を変化させた場合の l_{opt} と、上記の予想式を比較した (図7)。図7よりシミュレーションの結果と予想式が非常によく一致していることがわかる。この現象は次のように説明できる。 $t = nT$ ($\beta = 0$ から $\beta = 1$ にスイッチする時刻) において、出口から $\beta^* T$ サイト以内に存在する粒子が $nT + \tau \leq t < (n+1)T$ に潜在的に格子から退出できる可能性がある (どの粒子までが退出可能かどうかは $t = nT$ における粒子の配置に依る)。一方で、 $t = nT$ で出口から $\beta^* T$ サイト以上離れているサイトに存在する粒子は $nT + \tau \leq t < (n+1)T$ において格子から退出するこ

とは不可能であることから、それらの粒子のホップ確率を制御しても流量を改善させることはなく、むしろその次の出口開放期間開始時刻に出口に粒子が到達できていない状況を生じる可能性があるために逆効果にもなりうる。

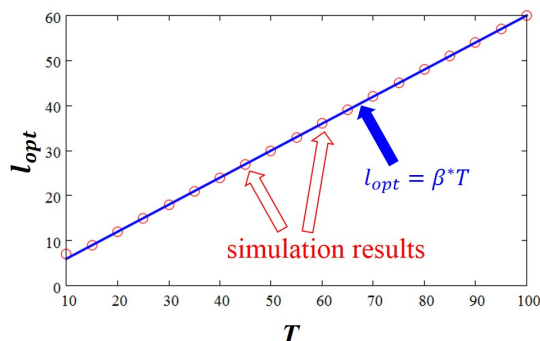


図7: T を変化させた時の l_{opt} の変化のグラフ。シミュレーションでの結果と近似直線がほぼ一致していることが分かる。

4 まとめ

ボトルネックにおける交通流量の改善を図ることは非常に重要であるが、やり方によってはかえって状況を悪化させることもある。本研究では、SIS ルール付の TASEP の改良モデルを分析することにより、粒子 (自動車、人) のホップ確率 (速度) の制御を適切に行うことで出口流量が改善されることを示すことができた。また、同じ割合でボトルネックの状態が変化する場合はその周期が短いほうがよい (例えば信号の場合は赤と青の割合が同じの場合では、切替の周期を短くするほうがよい) こと、周期に応じて適切に制御区間を定めると流量改善が増すという結果も得られた。

参考文献

- [1] M. Woelki, Phys. Rev. E **87**, 062818 (2013)
- [2] 西成活裕, 応用数理 **12.2**, 128-139 (2002)
- [3] R. Nishi, A. Tomoeda, K. Shimura, and K. Nishinari, Transportation Research Part B **50**, 116-129 (2013)
- [4] G. Jan and N. Bernard Phys. Rev. E **59**, 4899-4911(1999)