

スロースタートモデルにおける交互合流創発による流量改善

西遼佑^{1,2}, 三木弘史³, 友枝明保⁴, 柳澤大地^{2,5}, 西成活裕^{5,6}

¹ 東京大学大学院工学系研究科 ² 日本学術振興会 ³ 九州大学大学院総合理工学研究院

⁴ 明治大学先端数理科学インスティテュート ⁵ 東京大学先端科学技術研究センター

⁶ (独) 科学技術振興機構 さきがけ

概要

交互合流の創発は、高速道路合流部における渋滞のボトムアップ的な緩和策として期待される。この効果を、隣の車に反応して減速する車-車間相互作用を付加したスロースタートモデルを用いて検証した。シミュレーションと平均場近似を用いて検証した結果、スロースタート効果が大い(小さい)場合に、この創発によって流量が大き(小)く(小さく)なることが見出された。

Improvement of flux by emergent zipper merging in a slow-to-start model

Ryosuke Nishi^{1,2}, Hiroshi Miki³, Akiyasu Tomoeda⁴, Daichi Yanagisawa^{2,5}
and Katsuhiko Nishinari^{5,6}

¹ Faculty of Engineering, The University of Tokyo ² Japan Society for the Promotion of Science

³ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

⁴ Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences, Meiji University

⁵ Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

⁶ PRESTO, Japan Science and Technology Agency

Abstract

Emergent zipper merging is expected as a bottom-up method to reduce traffic jams at intersections or junctions on highways. We have investigated this effect by using a slow-to-start model with a vehicle-to-vehicle interaction, such that vehicles decelerate in responding to others on other lanes. Simulations and mean-field analysis have revealed that the flow rate becomes large (small) by the achievement of zipper merging under the condition of large (small) slow-to-start effect.

1 研究背景

数理物理学的なアプローチによる交通流の研究の発展に伴い [1, 2], 既存のトップダウン的な交通制御ではなく、ボトムアップ的な渋滞改善策の立案が期待されている。この観点から、我々は交互合流の創発手法を提案してきた。図 1(上) に示すように、織込部(合流と分岐のある道路)の渋滞原因は、合流後でしか隣接車線上の車を知覚できない状況が、乱

雑な車線変更をもたらすためだと考えられる。そこで、改善策として図 1(下) のように区画線(オレンジ色、車線変更禁止)を引く。この線に沿って走行する過程で、各車は隣の車を視認して離れあい、全体として交互合流が達成されていくと期待される。我々の手法は立体交差建設に比べて非常に安価であり、また視認による車線間相互作用だけでなく、無線通信 [3, 4] による援用も可能である。

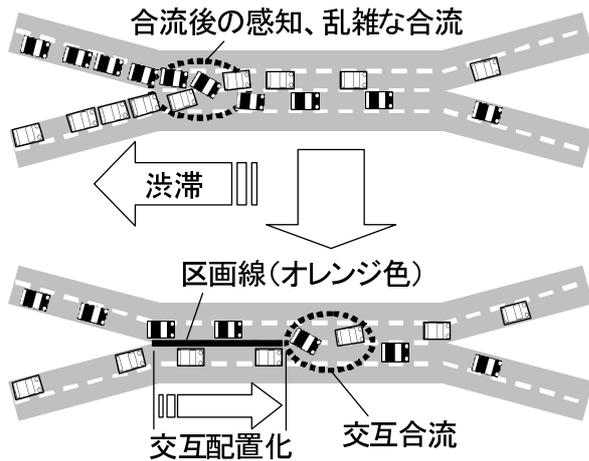


図1: (上) 織込部の渋滞. 隣接車線上の車を感知できないために, 乱雑な合流となり, 渋滞が発生する. (下) 交互合流の創発. オレンジ色の区画線に沿って車線間相互作用し, ボトムアップ的に交互配置化していく.

我々はこれまでに, セルオートマトン (CA) を用いて, 車線間相互作用のある二車線直進部における車の配置の空間変化を解析し, 交互配置化の創発現象を見出した [5]. 次の研究として, この創発による合流の流量変化を解析する.

2 モデリング

車線間相互作用を取り入れた簡潔なセルオートマトンモデルとして, Multiple Lanes Slow-to-Start (MLSIS) model を定義する. 車 i は時刻 t から $t+1$ の間に, 確率 v_i^t で 1 セル前進する. v_i^t は, 図 2 のように自車セル位置とその 1 セル前方の状況に依存し, $v_i^t \in \{0, r, q, 1\}$ に設定される. 図中左端の $v_i^t = 0$ は, 排除体積効果による前進不可条件である. $0 < r, q < 1$ は, 隣接車線上の車に反応してホップ確率を下げる車線間相互作用ルールであり, 自発的な交互配置化が期待される. 一方で, $q = r = 1$ は隣接車線上の車と全く相互作用しないルールである.

各車はパラレルアップデートされる. 図 2 下段のような合流部において, 二台の車が同時に合流しようとした場合は, 片方の車のみがランダムに選ばれ, そのホップ確率に応じて前進するものとする.

本モデルでは, 時刻 $t-1$ から t の間に排除体積効果のために前進できなかった場合, 時刻 t から $t+1$ の間のみ, ホップ確率には係数 s ($0 \leq s \leq 1$) が掛けられ, sv_i^t となる. これは, スロースタート (Slow-

$v_i^t = 0$	$v_i^t = r$	$v_i^t = q$	$v_i^t = 1$

図2: MLSIS model における確率 v_i^t . アスタリスクは任意の状態 (空または占有) を表す.

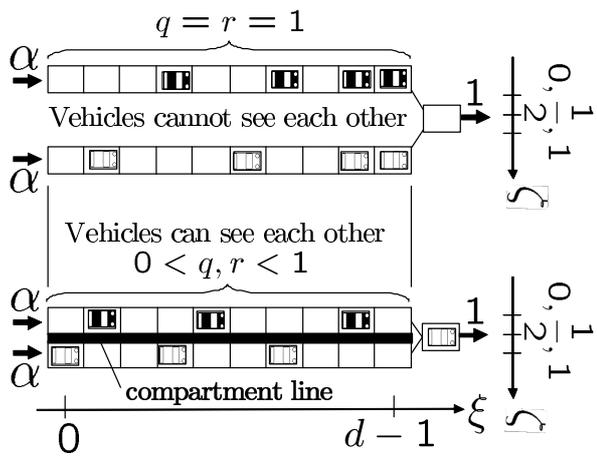


図3: 二車線が一車線に合流する格子. (上) 隣接車線上の車を感知できないために, 車線間相互作用のない合流 ($q = r = 1$). (下) 隣接車線上の車を感知して減速する車線間相互作用を付加した合流 ($0 < q, r < 1$).

to-Start, SIS) 効果 [6, 7, 8, 9] と呼ばれるルールである. $s = 0$ は, 排除体積効果による停止車がみな一回休みになるルールであり, $s = 1$ はそのような一回休みが起こらないルールである.

3 シミュレーションと理論解析

道路系はルールの単純化のため, 図 3 のように二車線合流部 (合流部手前 $\zeta = 0, 1$, 合流部 $\zeta = 1/2$) を用いる. 合流手前 ($0 \leq \xi \leq d-1$) の車線間相互作用は, なし ($q = r = 1$) と減速 ($0 < q, r < 1$) の二種類を用意する. なお, 隣の車から離れるために加速するルールは, 安全を考慮して除外する. 左端流入は, 各車線ごとに確率 α で試行し, 左端が空の場合のみ流入する. 右端流出は, 合流部の渋滞のみに注目するため, 確率 1 で流出する.

シミュレーションの計測量を二つ定義する。まず、交互配置の程度 $G(\xi)$ ($0 \leq \xi \leq d - 2$) を定義する。 $G(\xi)$ は、4 個のセル $\{(\xi, 0), (\xi, 1), (\xi + 1, 0), (\xi + 1, 1)\}$ において、 $\{((\xi, 0), (\xi, 1))\}$ に少なくとも車が 1 台いる全ての配置状態のカウント総数を分母に、 $\{((\xi, 0), (\xi, 1))\}$ に車が 1 台のみいて、かつ、 $\{((\xi, 0), (\xi, 1))\}$ に車がない配置状態のカウント数を分子にとった割合である。 $0 \leq G(\xi) \leq 1$ であり、 $G(d - 2) = 1$ は完全な交互合流が達成されていることを示す。次に、単位時間あたりに右端から流出する車の台数として、流量 Q を定義する。

G の ξ 方向の変化、および Q のスロースタート効果 s に対する変化を出力する。シミュレーション条件は下記の通りである。道路長は $d = 200$ とする。左端流入試行確率は $\alpha \in \{0.25, 0.33\}$ とする。 $\alpha \leq 1/3$ に限定する理由は、自由流入の期待値 $2\alpha/(1+\alpha)$ が合流部の最大流量 $1/2$ を上回る条件下 ($\alpha > 1/3$) では、不可避的に渋滞が発生するからである。車線間相互作用パラメータは、 $q = r \in \{0.5, 0.75, 1\}$ とする。条件を簡素にするために $q = r$ としている。また、粒子は直進を意識しつつ車線間相互作用すると想定し、 q や r をある程度 1 に近く設定している。なお、 q や r が 0 に近い条件下では、左端付近で直進移動しにくくなるため流量は大きく減少する。物理量の計測時間は、 $10^4 \leq t \leq 2 \times 10^4 - 1$ とする。

G の ξ 方向の変化のシミュレーション結果を図 4 に示す。簡単のため、 $s \in \{0, 0.95\}$ の場合のみを表示している。 $\alpha = 0.25$ では、 $q = r \in \{0.5, 0.75\}$ の場合に、 $\xi = d - 2 = 198$ にて $G = 1$ が達成される。これは、車線間相互作用によって完全な交互合流が創発されたことを示している。 $q = 0.75$ の場合よりも $q = 0.5$ の場合の方が、 $G = 1$ を達成するのに必要な走行距離は短い。すなわち、車線間相互作用が強いほど必要距離は短くなっている。また、 $q = r = 1$ の場合は、車線間相互作用がないため交互合流は達成されない。一方で、 $\alpha = 0.33$ では、 $q = r = 0.75$ の場合に交互合流が達成されない。この原因は、流入台数が増えたことで、完全な交互合流を達成するのに必要な相互作用区間長 d が大きくなるためである。

Q と s の関係のシミュレーション結果を図 5 に示す。図 4 にて交互合流を達成する場合は Q は s に対してほぼ一定であるが、達成しない場合は s に対して単調増加していて、両者は一点で交差している。この交点よりも小さな s の領域では、交互合流

を創発するほうが流量が大きくなるが、交点よりも大きな s の領域では、流量は小さくなっている。

この流量の逆転現象の原因は、非交互合流と交互合流で流量減少要因が異なるからである。非交互合流のボトルネックは合流部であり、流量減少は合流部でスロースタートする車が発生することで引き起こされ、流量減少の程度は s が小さいほど大きくなる。 $s = 1$ の場合はスロースタートする車がないため流量は最大化し、特に $q = r = 1$ の下では流量は車のフォーメーションに依存しなくなる。一方で交互合流のボトルネックは $G < 1$ の領域であり、流量減少は車線間相互作用によって引き起こされ、流量減少の程度は q や r が小さいほど大きくなる。 q や r が 1 に近い場合、交互配置化の過程でスロースタート状態になりにくいため、流量は s に対してほぼ一定となる。

上記のボトルネックの差異とその特性は、平均場近似によっても確認される。図 6 のように、非交互合流の場合は合流部に、交互合流の場合は左端に着目して平均場近似計算を行い、その結果を図 5 に示す。平均場近似結果は、シミュレーション結果と良く一致している。

4 結論

車線間相互作用のあるスロースタートモデルとして、MLSIS model を定義した。隣接車線上の車に反応してホップ確率を減少する相互作用を付加し、自発的な交互合流を達成した。この交互合流の流量と一切の車線間相互作用のない合流の流量を、シミュレーションとクラスター近似を用いて比較した。スロースタート効果が大きい場合は交互合流の流量のほうが大きい、スロースタート効果が小さい場合は交互合流の流量のほうが小さくなることを見出された。自動車の場合は慣性が大きいので、交互合流創発によって流量が増加することが期待される。

参考文献

- [1] D. Helbing, Rev. Mod. Phys. 73, 1067 (2001).
- [2] D. Chowdhury, L. Santen, and A. Schadschneider, Phys. Rep. 329, 199 (2000).
- [3] Y. Ikemoto, Y. Hasegawa, T. Fukuda, and K. Matsuda, in Proceedings. ICRA '04. (IEEE, 2004), vol. 5, p. 4387.

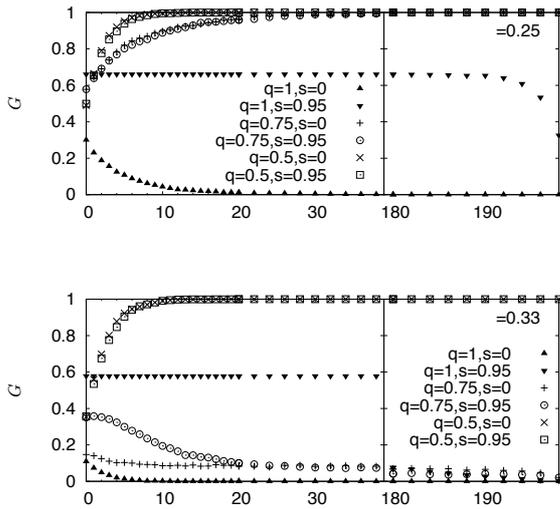


図4: G の ξ 方向の変化のシミュレーション結果. 条件は Sec.3 の通りである. $\alpha = 0.25$ では, 車線間相互作用のある $q = r \in \{0.5, 0.75\}$ において完全な交互合流 ($\xi = d - 2$ にて $G = 1$) を達成し, 車線間相互作用のない $q = r = 1$ においては達成しない. 一方で, $\alpha = 0.33$ では, $q = r = 0.75$ において交互合流が達成されない. この原因は, 流入台数が増えたことで, 完全な交互合流を達成するのに必要な相互作用区間長が伸びるためである.

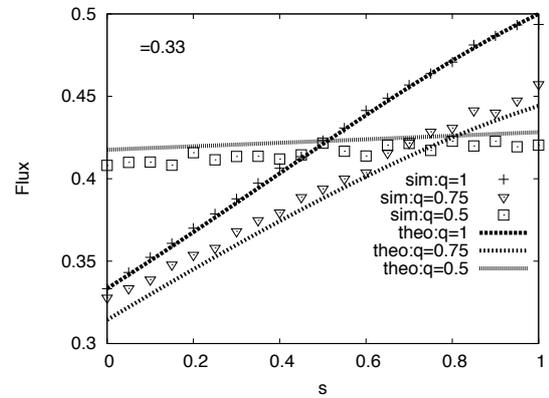
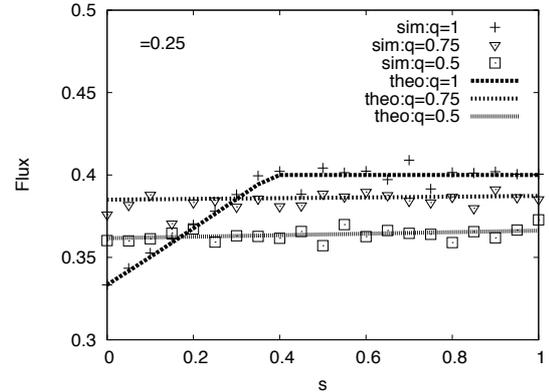


図5: 流量とスロースタート効果 s の関係 (点はシミュレーション, 線は平均場近似). シミュレーション条件は図4と同じである. 交互合流を達成する場合と達成しない場合とで, 流量の逆転が生じている.

- [4] S. Kato, S. Tsugawa, K. Tokuda, T. Matsui, and H. Fujii, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems 3, 155 (2002)
- [5] R. Nishi, H. Miki, A. Tomoeda, and K. Nishinari, Phys. Rev. E 79, 066119 (2009).
- [6] M. Takayasu and H. Takayasu, Fractals 1, 860 (1993).
- [7] S. C. Benjamin, N. F. Johnson, and P. M. Hui, J. Phys. A 29, 3119 (1996).
- [8] A. Schadschneider and M. Schreckenberg, Ann. Physik 6, 541 (1997).
- [9] R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Eur. Phys. J. B 5, 793 (1998).
- [10] R. Nishi, H. Miki, A. Tomoeda, D. Yanagisawa, and K. Nishinari (in preparation).

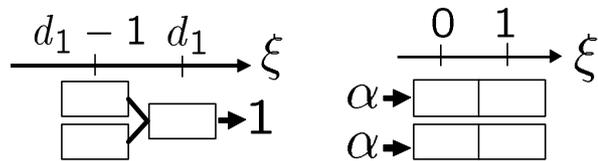


図6: 平均場近似で計算対象とするボトルネック領域. (左) 非交互合流. (右) 交互合流.