

ボトルネック上流における渋滞形成

山元 祥平, 日永田 泰啓[†], 只木 進一[†]

佐賀大学理工学部

[†] 佐賀大学学術情報処理センター

1 はじめに

速度制限等のボトルネックによって、下流の一部の流量が制限されている系の交通流を考える。ボトルネック上流における車の流れの振舞いと渋滞流の形成については、そのメカニズムに未解明の部分が残されている。ボトルネックのすぐ上流では振動的な密度揺らぎが発生する。その密度揺らぎは上流に伝わると、車両の停止と走行の安定したサイクルを作り出すまでに至る。

本稿では、ボトルネック上流の流れについて、特にボトルネック強度との関連性を議論する。

2 CMOV(結合写像型最適速度) モデル

本稿では、交通流のモデルとして最適速度モデルを離散化した CMOV(結合写像型最適速度) モデルを用いる。CMOV モデルは以下の式で記述される [1]。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (1)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \alpha (V_{\text{optimal}}(\Delta x) - v(t)) \Delta t \quad (2)$$

$$V_{\text{optimal}}(\Delta x) = \frac{v_{\text{max}}}{2} \left[\tanh\left(2\frac{\Delta x - d}{w}\right) + c \right] \quad (3)$$

ここで、 x は注目している車両の位置、 Δx は前の車両との車頭距離である。最適速度関数 $V_{\text{optimal}}(\Delta x)$ は車頭距離から車両の最適速度を導き、感受率 α は、ドライバーの最適速度への調整の度合いの強さを表し、調整に要する時間の逆数である。最適速度関数に現れる車両の最高速度などのパラメータ v_{max} 、 d 、 w 及び c は実測を元に適切な値を設定することができる [1, 2]。なお、速度に雑音は加えない。

3 形成される流れ

シミュレーションを行う系は長さ 10000m の 1 車線からなる開放端を持つ道路である。系の始端から車両が入り、最短車頭距離 Δx_{min} 進むと、次の車両が速度 0 で流入する。系の終端部、始端から 8000m ~ 10000m の区間に、ボトルネックとして車両に減速を強いる区間を設ける。つまり、ボトルネック内では各車両の最高速度が v_{max} から $f v_{\text{max}}$ ($0 \leq f \leq 1$) に減速される。

図1は、形成された車の流れを表した典型的な時空図である。車両は左上から右下へ向かって移動し、その軌跡が線で表されている。色が濃い部分は密度が高く、薄い部分は密度が低いことを表している。ボトルネック内は密度が低い自由走行流となっている。ボトルネック上流の流れは、低密度部と高密度部の二状態に大きく分かれているのが分かる。前者が自由走行流、後者が渋滞クラスタに対応している。渋滞クラスタは、ボトルネックのすぐ上流ではなく、2kmほど離れた地点から発生している。

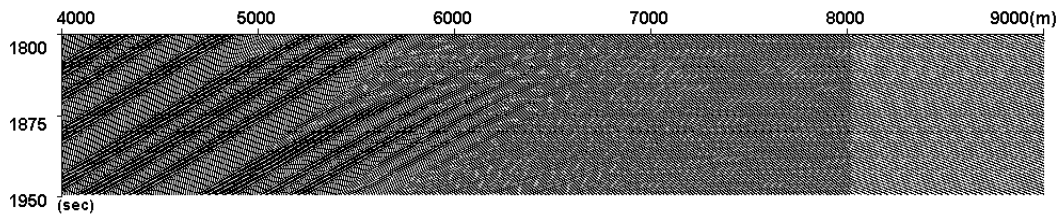


図 1: 時空図に表れた渋滞流

4 ボトルネック強度との関連

系のボトルネック強度を変化させ、渋滞流に与える影響を比較する。ボトルネック強度とは、ボトルネック区間における減速の度合い f を指す。「60%に制限する」という場合、ボトルネック内にある車両の最高速度 v_{\max} を、通常時の60% ($f = 0.6$) にまで落とす事を意味する。

図2は、車両間密度の空間変化について、ボトルネック強度別に比較をしたものである。制限40%の場合以外はボトルネック上流で密度が低密度部と高密度部の二状態に大きく分かれているのが分かる。

ボトルネック強度が弱いと、ボトルネックのすぐ上流で細かい密度の振れが発生する。この揺らぎは、上流に行くに従って急激に成長し、自由走行部分と渋滞部分の二状態に分かれて安定化する。

渋滞クラスタの発生間隔は、ボトルネック強度を弱くする (f を大きくする) に従って短くなる。やがて発生する渋滞クラスタは不安定となり、ボトルネック強度を90%ほど (系によってこの値は異なる) まで緩めると、渋滞クラスタが系の始端まで到達せず、途中で減衰し消えてしまうような状態となる。

一方で、ボトルネック強度が強い程、ボトルネック上流に発生する渋滞クラスターつづつの長さが長くなり、同時にその発生間隔が長くなる。ボトルネック強度を40%まで強くすると、もはや密度揺らぎの成長は見られず、ボトルネック上流の低速高密度な一様流が系全体を覆う状態になる (図2)。

4.1 ヒステリシスループの変化

ボトルネック上流における車両の挙動をヒステリシスループを見ることで調べる。

図3は、車頭距離-速度図におけるヒステリシスループを、ボトルネック強度を変えながら描いたものである。ボトルネック上流に渋滞が発生する場合の車頭距離-速度空間内での車両の軌跡は以下ようになる。ボトルネックから十分に上流に発生している領域では、車両の軌跡は一番外側のヒステリシスループであり、ほぼ停止した状態とほぼ自由走行を繰り返す。その振幅は、車両

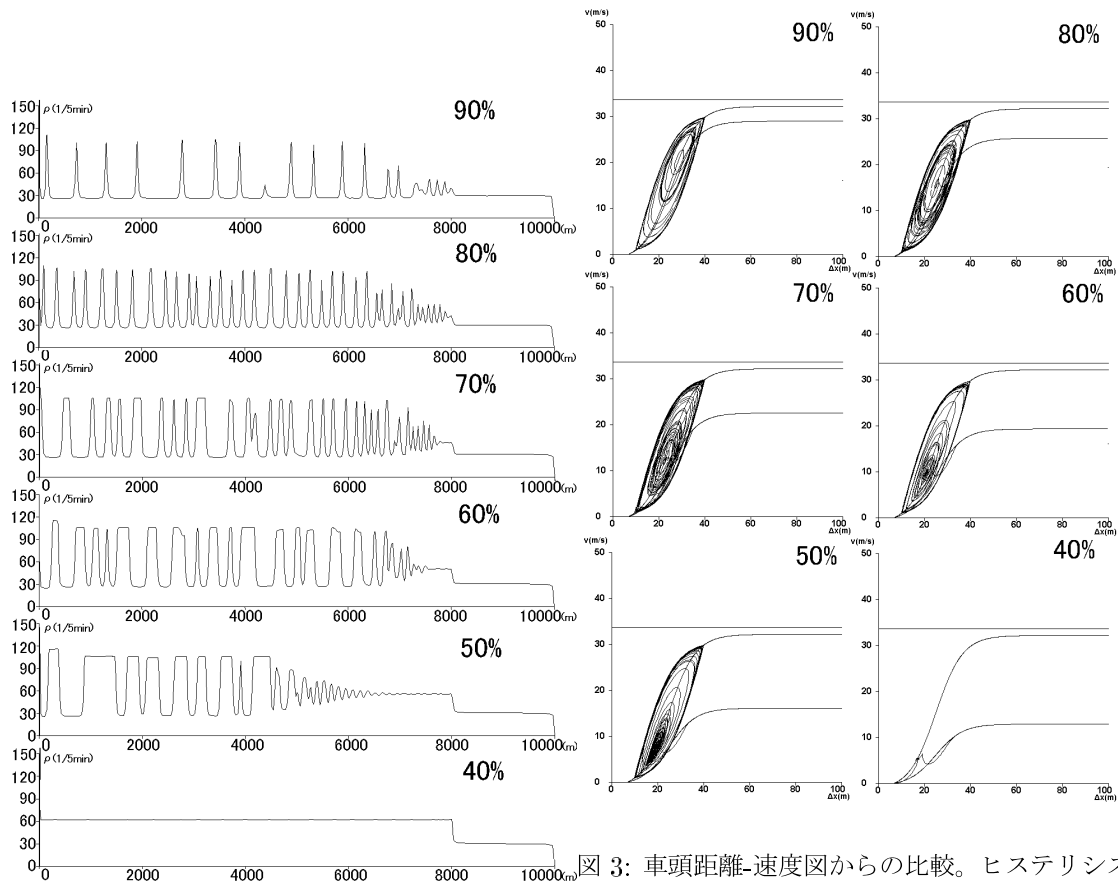


図 2: 車両間密度のボトルネック強度別の比較。渋滞の発生条件と、その発生サイクルにボトルネック強度との関連が見られる

図 3: 車頭距離-速度図からの比較。ヒステリシスループが収束して行く点が、ボトルネック上流の高密度流に対応している。各図におけるその収束点の位置推移は、ボトルネックにおける減速率に沿っている。ボトルネック内の速度制限の程度は、その外にある高密度な流れの速度及び密度に直接影響を与えている事が分かる。

がボトルネックに近づくに従って小さくなり、最適速度関数上の点に集まってくる。これがボトルネック上流の高密度な流れに対応している。また、各車両が描くこの軌跡を逆に辿ると、ボトルネック上流の高密度な流れで発生した密度揺らぎが、上流に行くにつれて成長していく過程にも対応する。

ボトルネック強度によって、系の上流部におけるヒステリシスループの形状の概要には変化が無い。しかし、ループが収束していく先の高密度流れは、速度制限の度合いに準じてその位置を変えている事が分かる。この位置は、ボトルネック内の制限速度とともに、上下する。この位置での解の安定性が、ボトルネック上流部に発生する高密度流れの安定性に影響している。

図2には渋滞流の発生間隔の変化がみられた。上述のように、ボトルネック強度を変化させることでボトルネック上流に形成される流れの速度と密度が決定される。この部分の密度が大きければ、上流に発生する流れでは、大きな渋滞クラスタを形成することで自由走行流部分の密度を下げなければならない。逆に、この部分の密度が低ければ渋滞クラスタのサイズは小さくなる。

5 まとめ

高速道路上の交通流に発生する渋滞は、流入量が交通容量を超えることで発生する。車両密度が臨界密度を越えることで渋滞クラスタが形成される。その様子を調べるために、開放端を持つ系においてボトルネックを設定し、渋滞形成の様子をシミュレーションによって調べた。

渋滞はボトルネックのすぐ上流に発生するのではない。ボトルネックの近くでは高密度の流れが発生する。その中に含まれる密度揺らぎが、ボトルネックから離れるに従って成長し、やがて渋滞クラスタを発生させる。

ボトルネックの開始地点での車両の挙動を考える。ボトルネックに進入した車両が減速した際、ボトルネックの後の後続車両は次々に車間の詰まりを強いられる。これはボトルネック上流に高密度な流れを生み、この状態は下流のボトルネックの存在により保たれ、不安定ながら解を持つ。

更に、この車両の過密状態は、ボトルネックに入る車両の減速の挙動を密度揺らぎとして拾い、伝播する。上流に行くにつれ成長した密度揺らぎは、渋滞と一様流との安定した二状態を形成する。

今回、渋滞流発生過程について定性的理解が可能となった。形成されるボトルネック上流の高密度流状態、及びその安定性に関する理論的解析が必要である。

参考文献

- [1] S. Tadaki, M. Kikuchi, Y. Sugiyama and S. Yukawa: *J. Phys. Soc. Jpn.***67** (1998) 2270.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: *J. Phys. I France* **5** (1995) 1389-1399.