

高速道路サグ・トンネル部における渋滞発生後捌け交通量を改善する走行挙動 Driving Behaviors for Mitigating Capacity Drop at Freeway Sag and Tunnel Bottlenecks

和田 健太郎¹, 甲斐 慎一郎², 堀口 良太³
Kentarō WADA¹, Shinichiro KAI² and Ryota HORIGUCHI³

本研究は、高速道路サグ・トンネルボトルネックを対象として、渋滞発生後の捌け交通量が渋滞発生時容量より低下する現象「Capacity Drop (CD)」の影響を低減する走行挙動を考察する。具体的にはまず、近年提案された連続体交通流理論に基づき2種類のCD回避運転挙動を提案し、その定性的特性について論じる。続いて、提案した挙動を実現する(自動運転)車両の混入率と捌け交通量の低下度合いの関係を理論およびシミュレーションにより定量的に分析する。そして、(i) CD低減にはボトルネック区間の緩慢な追従走行(i.e., 勾配変化に対する補償遅れ)による速度回復遅れを防ぐことが肝要であること、(ii) ボトルネック下流における加速挙動の改善は一部車両のみではその効果が限定的であること、を明らかにする。

This study investigates driving behaviors for mitigating the capacity drop (CD) phenomenon, which means the queuing discharge flow rate is less than the traffic capacity before congestion, at freeway sag and tunnel bottlenecks. Specifically, exploiting a recent advanced continuum traffic flow theory that describes the CD phenomenon endogenously, we first propose two CD-mitigation driving behaviors and discuss their qualitative properties. We next examine the quantitative relationship between the penetration rate of the (autonomous) vehicle implementing each of the proposed driving behavior and the reduction of the queue discharge flow rate through theoretical and simulation analyses. It is then revealed that (i) the prevention of the slow speed recovery due to the sluggish car-following behavior (i.e., the compensation delay for gradient change) at the bottleneck section is essential to mitigate the CD and (ii) the improvement of the acceleration behavior downstream of the bottleneck of only some vehicles has limited impact.

Keywords: サグ, トンネル, Capacity Drop, 渋滞発生後捌け交通量, 自動運転
Sag, Tunnel, Capacity Drop, Queue Discharge Flow, Autonomous Vehicle

1. はじめに

高速道路上のボトルネックでは、一旦渋滞が発生すると、ボトルネックの捌け交通量が渋滞発生時交通量(容量)よりも低下する、Capacity Drop (CD)現象が一般的に観測される¹⁾。単路部ボトルネックにおけるCD現象は、古くは、Edie and Foote²⁾や越³⁾により指摘されている。このような渋滞発生後の現象は、渋滞継続時間を長引かせ、結果として多大な遅れを追加的にもたらし得る。そのため、到着交通量をボトルネック上流で容量以下に抑制する(i.e., ボトルネックにおける渋滞発生を抑制する)、ランプメタリングや可変速度規制を実施する1つの

根拠となっている。

また、(CD完了後の)安定渋滞状態では、ボトルネック付近で極めて緩慢な速度回復挙動が見られ、これが捌け交通量を規定する³⁾。こうした挙動への対策としては、速度早期回復促す注意喚起や走光型視線誘導システムが国内各地の単路部ボトルネックに導入され、捌け交通量(および渋滞発生時交通量)が一定程度改善することが報告されている^{4),5),6),7)}。ただし、これらのシステムがどのように個々の車両の走行挙動(ミクロ)に影響を与え、また、それがCD現象(マクロ)の低減に繋がるのかのメカニズムは必ずしも明確にはなっていない⁵⁾。

-
- 1 正会員, 博士(情報科学), 筑波大学 システム情報系
Member, Ph.D. (Inf. Sci.), Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 e-mail: wadaken@sk.tsukuba.ac.jp Phone: 029-853-3614
 - 2 正会員, 修士(工学)・TOE, 株式会社アイ・トランスポート・ラボ
Member, ME, TOE, i-Transport Lab. Co., Ltd.
 - 3 正会員, 博士(工学)・TOE, 株式会社アイ・トランスポート・ラボ
Member, Dr. Eng., TOE, i-Transport Lab. Co., Ltd.

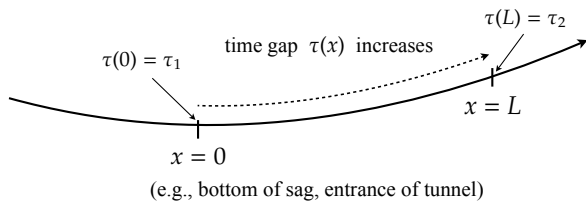


図1 単路部ボトルネック区間の設定

さらに近年の自動運転技術の進展は、ボトルネックの渋滞発生時や発生後の様々な段階で、車両レベルの制御を可能とする。鈴木ら⁸⁾は、サグ部の渋滞緩和に資する Adaptive Cruise Control (ACC) の性能を制御規範、制御目標、加速性能、過渡応答特性の観点から包括的に検討し、その効果をマイクロ交通シミュレーションにより評価している。Goni-Ros et al.^{9),10)}も同様に、サグ部を対象に、ACC や車車間通信も考慮した CACC、自動運転車両の中央管理を想定した最適制御を提案・評価している。しかし、これらの評価基盤となるマイクロ交通シミュレーションは、サグ部におけるボトルネックの顕在化 (i.e., 渋滞発生時の現象) を主な記述対象としており、CD 現象については外生的に扱われている、あるいは、再現性について十分検証されていないという課題がある。

本研究は、単路部ボトルネックの CD 現象の発生を内生的に記述する連続体交通流理論^{12),13)}に基づき、CD の影響を低減する走行挙動を考察する。具体的にはまず、従来理論により示された CD 現象のメカニズムを概観する。そして、そのメカニズムを踏まえた、CD の影響を低減するボトルネック区間の追従挙動、ボトルネック下流の加速挙動、また、それらの効果について論じる。最後に、想定した挙動を実現する (自動運転) 車両の混入率と捌け交通量の低下度合い (CD 比率) の関係を理論およびシミュレーションにより明らかにする。

2. 連続体交通流理論

本章では、Jin¹²⁾, Wada et al.¹³⁾ によって提案された連続体交通流理論について概説する (この理論の実データによる検証は和田ら¹⁴⁾を参照されたい)。

2.1 状況設定と主要な仮定

本稿では、図1に示すような、単路部ボトルネック区間 $x \in [0, L]$ を含む次元の道路を考える。ボトルネック区間内では、先行車両との最小車頭距離 d を維持するために後続車両が必要な時間 “時間ギャップ” (time gap) $\tau(x)$ が線形に増加すると仮定する。

$$\tau(x) = \tau(0) + \Delta\tau \cdot (x/L) \quad x \in [0, L] \quad (1a)$$

$$\tau(0) = \tau_1, \tau(L) = \tau_2, \Delta\tau \equiv \tau(L) - \tau(0) > 0 \quad (1b)$$

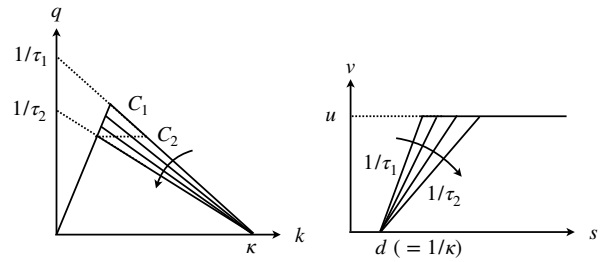


図2 交通量-密度 FD (左) と車頭距離-速度 FD (右)

その他の区間については、一般性を失うことなく、 $\tau(x) = \tau_1$ とする。この仮定は、勾配変化により無意識に速度が低下しているにも関わらず、車頭 (車間) 距離を保とうとする「勾配変化に対する補償遅れ」と解釈することができる。

具体的には、区分線形の Fundamental Diagram (FD) (交通量-密度関係、車頭距離-速度関係) を仮定すると、時間ギャップの変化は図2のように表される。ここで、 q, k, s, v は、それぞれ、交通量、密度、車頭距離、速度であり、パラメータ u, d, κ ($\kappa = 1/d$) は、自由流 (希望) 速度、最小車頭距離、ジャム密度である。このうち、車頭距離-速度 (車両の観点) 関係からは、時間ギャップ変化の結果として補償遅れが生じていることが見てとれる。一方、交通量-密度関係 (道路の観点) からは、時間ギャップ変化の結果としてサグ区間内で (渋滞発生時) 容量が C_1 から C_2 へと空間的に低下していることがわかる。つまり、このモデルにおいては、サグのボトルネック容量は外生的に与えられている*1。

この理論の2つ目の主要な仮定は、車両の加速度は物理的限界やドライバーの反応、勾配等による上限があるというものである。具体的には、加速度上限は次の有界加速度 (BA: Bounded Acceleration) モデルにより与えられると仮定する：

$$A(x) = a_0 - g\Phi(x) \quad (2)$$

ここで、 $g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ は重力加速度、 $\Phi(x)$ は勾配 (“decimal grade”), a_0 はパラメータである。後述するが、この加速度限界は、渋滞の先頭が明確には把握できず、アクセルを十分に踏み込まないという「緩慢な加速」を表現していると解釈することができる。なお、加速度限界が、現在速度 v と希望速度 u の乖離の度合いに応じて決まるとい、より一般的なモデル (e.g., TWOPAS モデル) を考えることもできる¹²⁾。

2.2 BA-LWR モデルとその解法

以上の設定の下、本研究で扱う連続体交通流モデルは、Lighthill-Whitham-Richards (LWR) モデルに加速度限界を

導入した BA-LWR モデルとして表現される.

$$k_t + (kv)_x = 0 \quad (3a)$$

$$\begin{cases} v = V(x, k) & \text{if } a < A(x) \\ v \leq V(x, k) & \text{if } a = A(x) \end{cases} \quad (3b)$$

ここで, 下付き添字は時間 t , 位置 x による偏微分, $V(x, k)$ は以下の式で表される地点依存の車頭距離-速度 FD (車頭距離 $s = 1/k$) を表す.

$$V(x, k) = \min\{u, (1/\tau(x))(s - d)\} \quad (4)$$

式 (3a) は保存則, 式 (3b) は加速度 $a (\equiv v_t + vv_x)$ の限界を表す. より具体的には, 式 (3b) は, 加速度が $A(x)$ より小さいとき, 速度は FD から決まり, 加速度が $A(x)$ に一致するとき, 微分方程式 $v_t + vv_x = A(x)$ の解として速度が決まることを表している.

このモデルを解析する, また車両の異質性を考慮するにあたっては, オイラー座標系で定式化した上記のモデルを, ラグランジュ座標系 (ドライバの視点) で表現するのが有効である. 具体的には, 上記のモデル (の離散化版) は, n 番目車両の時刻 t の位置 $X(t, n)$ を変数とした, 次の追従タイプのモデルに帰着する.

$$\begin{aligned} X(t + \Delta t, n) &= X(t, n) \\ &+ \min\{V(x, s(t, n)), v(t, n) + A(x)\Delta t\}\Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, $s(t, n) \equiv \{X(t, n - \Delta n) - X(t, n)/\Delta n\}$ である. $s(t, n)$ は $\Delta n = 1$ とすれば, 通常的車頭距離に一致する. また, 連続体極限 ($\Delta t/\Delta n$ 一定の下, $\Delta n \rightarrow 0$) をとると, モデル (3) に収束する. なお, このモデルを計算する際に $\Delta n = 1$ とすると, 数値拡散 (誤差) の影響を大きく受ける¹³⁾. 従って, 精度よく計算するためには, $\Delta t/\Delta n = \tau_1$ の下, $\Delta n \ll 1$ として計算するのが望ましい. ただし, 実際の車両として解釈するのは, あくまで n が整数のものに限るべきであろう.

式 (5) のモデル表現により, 補償遅れの仮定が, CD 現象に関わる別の重要な運転挙動を表現していることがわかる. 具体的には, モデル (5) (の流体極限) の追従状態では, Newell の追従モデル¹⁵⁾ と同様に,

$$X(t, n) = X(t - \tau(x), n - 1) - d \quad (6)$$

が成立する. つまり, 先行車両の情報は時間 $\tau(x)$ 後に最小車頭距離 d 上流の追従車両に伝わる. この両辺を時間で微分すると,

$$\begin{aligned} v(t, n) &= \left[\frac{1}{v(t - \tau(x), n - 1) + L} + \frac{\Delta\tau}{L} \right]^{-1} \\ &\leq v(t - \tau(x), n - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

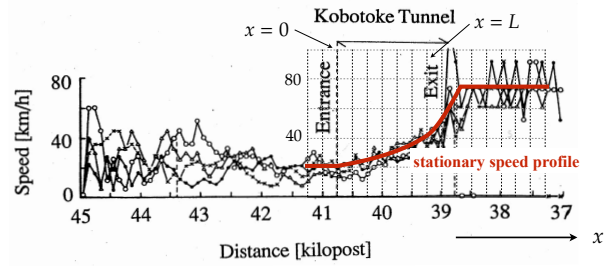


図3 定常状態の速度回復プロファイル¹³⁾ (赤線: モデル)

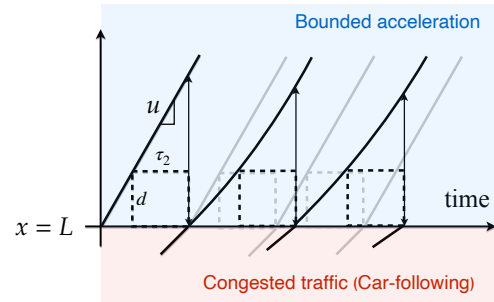


図4 CD 現象のメカニズム (黒実線: モデルの車両軌跡, 灰色実線: BA なしモデルの車両軌跡)

が得られる. この式は, 補償遅れのない ($\Delta\tau = 0$) 場合には2行目の不等式が等式となり, 補償遅れが生じる ($\Delta\tau > 0$) 場合に, 狭義の不等式となる. つまり, 補償遅れのあるボトルネック区間では, 先行車両の速度はより低下して追従車両に伝わる. これは, 減速時には「減速波の上流増幅伝搬」, 速度回復時には追従する先行車両の速度変化への対応が遅れる「緩慢な追従挙動」を表す.

2.3 CD 現象のメカニズム

以上のモデルをキャリブレーションし, 小仏トンネルにおける (CD 完了後の) 渋滞安定状態における速度回復過程の観測¹¹⁾ を再現した結果が図3である. 上記のモデルでは, 2km 超に渡るこの速度回復過程のうち, $x \leq L$ のボトルネック区間の速度回復は FD に従う追従モードで行われ, ボトルネック下流 $x \geq L$ の自由流速度までの速度回復は BA モードでなされる. この空間的なパターンは現実の交通流でもみられる¹⁴⁾.

運転挙動が $x = L$ で切り替わるという以上の空間パターンは, 捌け交通量を決定する渋滞の先頭がこの地点にあることを意味している. そして, この渋滞の先頭で生じる「緩慢な追従」と「緩慢な加速」の相互作用により, 渋滞発生後から捌け交通量が低下していく過程が内生的に記述される. 具体的には, 一旦渋滞が発生すると, 図4に示すように, (i) 緩慢な追従により各車両の $x = L$ の速度は, (図の点線四角形前方を走る) 先行車両の速度より遅くなる (i.e., 式 (7)). また, (ii) 緩慢な加速により, $x \geq L$ で自由流速度へとただちに速度回復せず, 結

果として後続車両の $x = L$ での車頭時間が増加する。そして、この (i) と (ii) の悪循環が、渋滞安定状態に到達するまで続き、捌け交通量が低下していく。また、この最終安定状態の捌け交通量 $C^- (< C_2)$ は解析的に得ることができる¹³⁾。

$$C^- = \frac{y}{1 + y\tau_2} \quad \text{where } y \equiv \left(\frac{A(L)L}{d^2\Delta\tau} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

なお、図中の灰色実線で示したように、BA なしモデル (i.e., LWR モデル) では (ii) の効果が働かず、捌け交通量の低下も生じない。

3. CD を低減する走行挙動のタイプ

本章では、前章のメカニズムを踏まえ、CD の影響を低減する走行挙動を考える。こうした走行挙動は、自動運転車両の一機能 (e.g., ACC) として実現すると想定しており、次章以降では自動運転車両の混入率と CD 比率 ($= 1 - C^-/C_2$) の関係を分析する (ここで、前章の設定を人間が運転する「一般車両」とする)。なお、本稿では CD を低減する走行挙動に議論を限定するため、以下で考えるどの走行挙動においても $\tau(L) = \tau_2 \geq \tau(x)$ を仮定する。つまり、ボトルネック容量は常に C_2 である。

第1の走行挙動タイプは、緩慢な追従を回避することにより CD の低減を志向するものである (以降、「Gradient Compensation (GC) 自動運転」)。GC 自動運転は、勾配情報を有する地図情報あるいは勾配のリアルタイム・モニタリングに基づき、補償遅れを解消するものと想定することができる。具体的には、モデルの仮定のうち式 (1b) を次のように変更する。

$$\tau^{GC}(x) = \tau_2, \forall x, \Delta\tau^{GC} = 0 \quad (9)$$

この設定では、 $x \neq L$ で $\tau(x) < \tau^{GC}(x)$ であり、目標車間時間が一般車両より長い ACC 車両と解釈することができる^{*2}。一見すると、このような挙動こそが緩慢な追従と思われるかもしれない。しかし、ボトルネック $x = L$ での時間ギャップより長い時間ギャップを取らない限り (i.e., $\tau^{GC}(x) \leq \tau_2$)、一般に懸念されるボトルネック容量を低下させることはない。また、式 (7) で見たように、CD 現象に関わる緩慢な追従挙動 (あるいは、減速波の上流増幅伝搬) を回避するためには、時間ギャップの「変化」を小さくすることが重要である。これが、式 (9) のように設定している理由である。なお、GC 自動運転車両では BA モデル (2) の第2項の勾配項の影響が消え、加速度上限も大きくなると考えるのが自然である。ただしここでは、「緩慢な追従」のみを解消した効果を考えるために、加速度上限は一般車両と同じとする。

図5に、GC 自動運転車両の走行挙動と後続車両への影響のイメージを示す。この図から分かるように、GC 自動

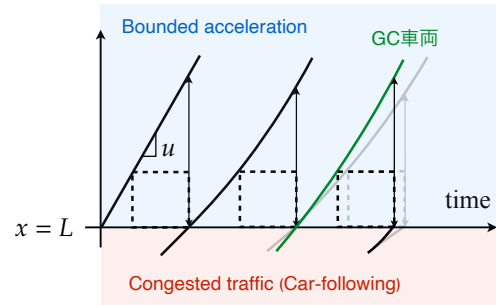


図5 GC 自動運転車両の走行挙動と後続車両への影響 (黒・灰色実線：一般車両, 緑実線：GC 車両)

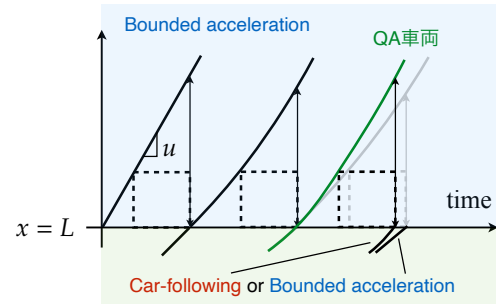


図6 QA 自動運転車両の走行挙動と後続車両への影響 (黒・灰色実線：一般車両, 緑実線：QA 車両)

運転車両は、一般車両に比べてより高い速度で $x = L$ に到着し、速やかに速度回復できる (ボトルネックを抜ける初速が上がっているだけで、加速度上限が大きくなっているわけではないことに注意)。その結果、後続車両がより短い車頭時間でボトルネックを通過でき、捌け交通量の低下抑制に繋がると期待することができる。

第2の走行挙動タイプは、緩慢な加速を回避することにより CD の低減を志向するものである (以降、「Quick Acceleration (QA) 自動運転」)。具体的には、BA モデル (2) を次のように変更する。

$$A^{QA}(x) = a_0^{QA} - g\Phi(x) > A(x) \quad (10)$$

先にも述べたように、この加速度上限は、必ずしも物理的な限界を表すものではない。実際、小仏トンネルのケースでは、 $a_0 = 0.312$ [m/s²], $A(L) = 0.087$ [m/s²] と推定されており、一般的に最大加速度として考えられる 1.00 [m/s²] 強に比べて極めて小さい。これは、渋滞先頭を抜けたにも関わらずそれが明確でないためにアクセルを十分に踏み込まないというドライバの反応が多分に反映された結果であろう。一方、QA 自動運転では、渋滞先頭か否かは関係なく、あくまで制御目標とする (このモデルでは、FD で定められる) 目標車頭距離や車頭時間より大きな間隔があけば、あらかじめ定められた適切な加速度で先行車に再び追いつくか自由流速度に回復するまで加速する。そのため、一般車両に比べてより俊敏な加速が可能になると想定し、式 (10) のように設定している。

表1 小仏トンネル再現パラメータ¹³⁾

パラメータ	値	パラメータ	値
u	75 [km/h]	L	1500 [m]
κ	140 [veh/km]	a_0	0.312 [m/s ²]
τ_1	1.5 [s]	$g\phi(x)$	0.225 [m/s ²]
τ_2	2.1 [s]	$A(x)$	0.087 [m/s ²]

図6に，QA自動運転車両の走行挙動と後続車両への影響のイメージを示す。QA自動運転車両は，GC自動運転と異なり， $x \leq L$ では一般車両と挙動は変わらない。しかし， $x \geq L$ では一般車両より高い加速度で速度回復するのが特徴である。後続車両への影響は2つの状況が考えられる。1つは，後続車両がQA車両に追従し，より短い車頭時間でボトルネックを通過できる状況（図中の“Car-following”の車両軌跡）である。この場合の効果は，GC自動運転車両のそれと同じである。もう1つは，一般車両のより小さな加速限界では $x \leq L$ でQA車両に追従できなくなり，後続車両が車群の先頭車両“moving bottleneck”としてボトルネックを通過する状況（図中の“Bounded acceleration”の車両軌跡）である。このような場合，QA自動運転車両は，必ずしも捌け交通量の低下抑制に繋がらない。

4. 理論解析

以降では，表1を一般車両のパラメータと設定し，自動運転車両の混入率とCD比率の関係を具体的に分析する。混入率0%の状況では，ボトルネック容量は $C_2 = u/(d + \tau_2 u) = 1474$ [veh/h/lane]，渋滞安定中の捌け交通量は $C^- = 1325$ [veh/h/lane]であり，CD比率（ $\equiv 1 - C^-/C_2$ ）は約10%である。本章では，理論解析を行い，次章でシミュレーションによる分析結果を示す。なお，本研究の主眼は追従挙動にあり，車線変更は考慮しない。

4.1 混入率100%の場合

まず，混入率100%の状況を考える。このような同質な車両により交通流が構成される場合，理論式(8)がそのまま利用できる。GC自動運転車両が100%の場合， $y \rightarrow \infty$ となるため， $\lim_{y \rightarrow \infty} C^- = 1/\tau_2 > C_2$ が得られる。これは，CDが生じないことを意味する。一方，CDが生じない境界 $C^- = C_2$ になる $\Delta\tau$ を考えると，

$$\Delta\tau = A(L)Ld/u^3 (\approx 0.10 \text{ [s]}) \quad (11)$$

である。つまり，時間ギャップの変化をゼロとせずとも， $\Delta\tau^{GC} \leq 0.10$ [s]の時間ギャップの変化であれば，CDの発生を防ぐことができる。

QA自動運転車両が100%のとき，CDが生じない境界 $C^- = C_2$ になる $A(L)$ を考えると，

$$A(L) = u^3 \Delta\tau / (Ld) (\approx 0.506 \text{ [m/s}^2\text{]}) \quad (12)$$

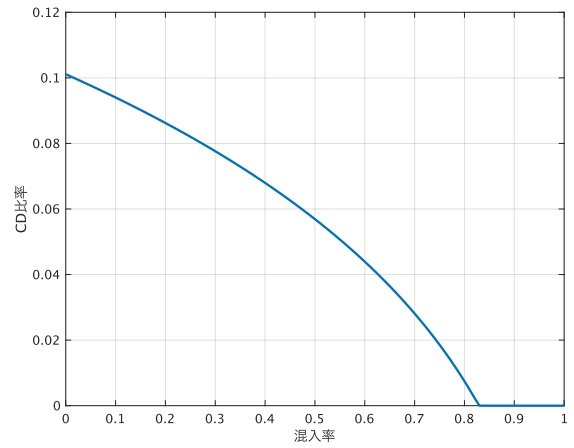


図7 GC車両混入率とCD比率の期待値

である。つまり，勾配の影響を除いて， $a_0^{QA} \geq 0.731$ [m/s²]となると，CDの発生を防ぐことができる。ただし，(GC自動運転車両同様)この限界よりも性能が高い $a_0^{QA} = 1.00$ [m/s²]として，以降の解析を行う。

4.2 混在環境の場合

続いて，一般車両と自動運転車両が混在する環境を考える。まず，GC自動運転車両を考えると，車頭距離-速度FDに異質性のある交通流を考える必要がある。Wada et al.¹³⁾によれば，このような状況下の交通流の挙動は，パラメータの期待値で近似的に記述することができる。具体的には，まず，渋滞安定中の $x = L$ における速度 v^- は，次のように近似できる。

$$v^- \approx \left(\frac{A(L)Ld}{\mathbb{E}[\Delta\tau]} \right)^{1/3} \quad (13)$$

ここで， $\mathbb{E}[\Delta\tau] = \omega \Delta\tau^{GC} + (1 - \omega)\Delta\tau = (1 - \omega)\Delta\tau$ であり， $0 \leq \omega \leq 1$ は自動運転車両の混入率を表す。従って，渋滞安定中の捌け交通量の期待値は，

$$\mathbb{E}[C^-] = \frac{v^-}{d + \tau(L)v^-} \quad (14)$$

である。ここで，右辺の分母は $x = L$ のFDから決まる車頭距離を表す。つまり，GC自動運転車両の混入は，交通流全体として時間ギャップの変化率を $(1 - \omega)$ だけ小さくする効果を持つ。

以上の関係を用いて，GC自動運転車両混入率とCD比率の期待値を図示したものが，図7である。CD比率の期待値が0より大きい領域で凹関数となっており，混入率が大きいほど累積的に効果が大きくなるのがわかる。また，およそ83%の混入率でCDが生じなくなっているのは， $(1 - 0.83)\Delta\tau \approx 0.10$ [s]となるためである。今回の状況設定では，CD比率を2%減らすためにおよそ3割のGC自動運転車両の混入が必要となる。

続いて, QA 自動運転車両を考えると, BA モデルに異質性のある交通流を考えることになる. このような状況下の交通流の挙動は, パラメータの期待値で近似することはできない¹³⁾. なぜなら, 先にも述べた, QA 自動運転車両の後続一般車両が“moving bottleneck”となる状況が生じ, そうした加速性能の悪い車両にさらに後続の車両が制約を受けるためである. つまり, パラメータの期待値で記述する状況よりも, 実現する捌け交通量は小さくなる. 究極的には, 加速性能のよい自動運転車両が混入したとしても, その効果が発揮されないという状況が生じ得る. QA 自動運転車両の混入率と CD 比率の関係は, 次章のシミュレーションによって分析する.

5. シミュレーション

5.1 設定

前章の理論的考察の妥当性をシミュレーションにより確認する. シミュレーションは, BA-LWR モデルを離散化した式(5)に基づいて行う. 前述の通り, この式では誤差を小さくするために, なるべく $\tau_1 = \Delta t / \Delta n$ かつ Δn を小さくすることが望ましい. ここでは, 従来研究¹³⁾も参考に, 時間刻み $\Delta t = 0.05$ [s], 車両台数の刻みは $\Delta n = 0.04$ [veh] と設定した. このときの混入率 0% のケースにおける C^- の理論値との誤差は 1 [veh/h/lane] 未満である.

到着需要は, ボトルネック容量 C_2 より大きい 1500 [veh/h] に設定しており, シミュレーションの最初の車両以外はボトルネック区間で必ず追従状態となる状況である. 一般車両, GC/QA 自動運転車両のパラメータ設定は, 前節の理論と同じである. シミュレーション時間は, 1 時間とし, 渋滞安定状態とみなせる 30 分以降⁴³⁾ の $x = L$ における交通量の平均値を捌け交通量とした. 自動運転車の混入率は, 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 90%, 100% と設定し, 簡単のために, その混入率に従って一定間隔で自動運転車両を混入させた.

5.2 結果

シミュレーション結果を図 8 に示す. 前章で考察した通り, GC 自動運転車両については混入率の増加とともに CD 比率の改善が見られ, 混入率が 90% の時点で CD が解消されている.

一方, QA 自動運転車両については, 混入率 50% までは捌け交通量の改善はほぼ見られず, 90% となっても改善は 0.7% にとどまる. この状況を理解するために, 図 9 に, QA 自動運転車両の混入率 90% における渋滞安定状態の $x = L$ 近傍の速度分布を示す. 点線で囲まれた QA 自動運転車両の車群の到着によって, 一時的にボトルネックの速度は 60 [km/h] 程度まで改善するが, 後続一般車両によってその速度改善がリセットされている, かつ, その

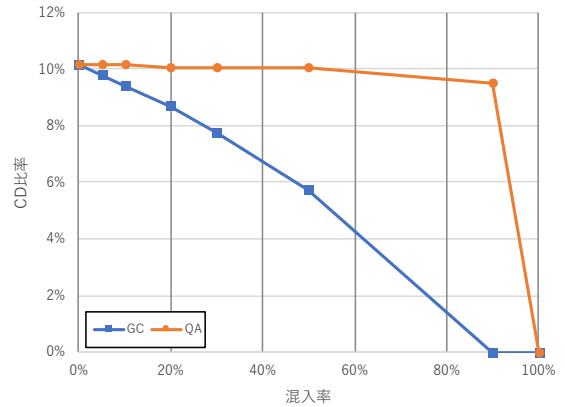


図 8 シミュレーションによる自動運転車両混入率と CD 比率の関係

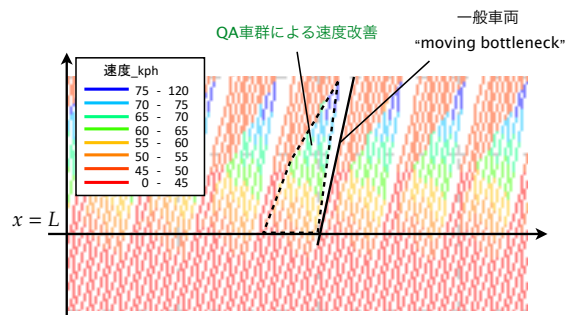


図 9 渋滞安定状態における $x = L$ 近傍の速度分布 (QA 車両混入率 90%)

前方に空白領域が生じている (i.e., “moving bottleneck” 現象が生じる) 様子が見て取れる. このリセットが改善を限定的にする最大の要因である. 今回のシミュレーションでは, 混入率に従って一定間隔で自動運転車両を混入させたため, 速度改善が一定間隔でリセットされたが, ランダムな混入を考えると, より大きな自動運転車両の車群が形成され, 速度回復波がより上流まで伝搬し得る. しかしその場合にも, 一旦加速性能の悪い一般車両が混入すると, 速度改善がリセットされることに変わりはないため, QA 自動運転車両の効果が限定的となる状況が生じるであろう.

以上より, 単路部ボトルネックにおける CD の影響を低減させるためには, 第一義的にボトルネック区間 $x \leq L$ における緩慢な追従挙動による速度回復の遅れを減じることが肝要であることが明らかになった. また, 加速性能の改善は, 一部車両のみではその効果が限定的であることもわかった.

6. おわりに

本研究は, 単路部ボトルネックの CD 現象の発生を内生的に記述する連続体交通流理論に基づき, CD を低減

する走行挙動を考察した。具体的には、従来理論により示されたCD現象のメカニズムを踏まえた、CDを低減するボトルネック区間の追従挙動、ボトルネック下流の加速挙動、また、それらの効果について論じた。また、想定した挙動を実現する(自動運転)車両の混入率とCD比率の関係を理論およびシミュレーションにより分析した結果、以下のことが明らかになった。

1. 緩慢な追従による速度回復の遅れを回避する(i.e., 勾配による補償遅れを解消する)車両は、混入率の増加とともにCDの負の影響を低減する。
2. 渋滞の先頭における緩慢な加速を回避する車両は、一部車両のみではその効果は限定的である。

以上の結果は、CD現象を引き起こす2つの要素のうち一方のみを解消する両極の走行挙動を想定して得られた結果である。一方、実際のACCや走光型視線誘導システムでは、両方の走行挙動を考慮/意図した開発が行われると考えられる。しかし、その場合であっても、両者の影響に大きな差があるという今回の結果は、ボトルネック区間における挙動の改善が肝要であることを示唆している。

この示唆に関連すると思われる興味深い研究として、走光型視線誘導灯の効率的な運用方法を検討した増本ら⁶⁾がある。この研究では、渋滞先頭の上下流それぞれ2ブロック(計4ブロック)を異なる組み合わせで点灯させ、その空間パターンの交通流への影響を実証的に検証している。結果(当該研究の図18)、既存の設置事例で多く見られる下流を中心として点灯したパターンは、全体で点灯したパターンよりも捌け交通量は低く、上流側を中心として点灯したパターンが最も捌け交通量が高くなる、という観測がなされている。本研究とも整合するこの結果が、考察したメカニズムによるものであるかは現時点では明らかではない。しかし、今回の理論と実際の現象を照らし合わせることにより、より効率的な運用につながる可能性があり、今後の重要な研究課題であると考えられる。

謝辞. 本研究は、JSPS 科研費・基盤研究C(課題番号: 19K04637)の助成を受けた研究の一部である。また、本稿の修正にあたっては匿名の査読者からの有益なコメントを参考とした。ここに記し、感謝の意を表します。

補注

- *1 ボトルネック容量はサグ区間内での自由流速速度の(無意識の)低下にも影響を受けるであろう。しかし、CD現象とは無関係であるため一定と仮定する。
- *2 追従状態の車頭距離-速度FDを変形すると、 $\tau = (s-d)/v$ である。つまり、時間ギャップは現在速度で「車

頭距離-最小車頭距離」(≈車間距離)をクリアするためにかかる時間である。

- *3 今回の設定ではおよそ20分程度かけて、安定渋滞状態に至る¹³⁾。

参考文献

- 1) Wada, K., Seo, T., Shiomi, Y.: Flow Breakdown, *International Encyclopedia of Transportation*, 4, 143–153, 2021.
- 2) Edie, L.C., Foote, R.S.: Traffic flow in tunnels, *Highway Research Board Proceedings*, 334–344, 1958.
- 3) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, 371/4–5, 1–7, 1986.
- 4) 遠藤元一, 中川浩, 深瀬正之, 橋本弾: 東京湾アクアラインの渋滞対策について, 交通工学論文集, 1(4), B_1–B_8, 2015.
- 5) 塩見康博, 北村彩葉: 交通容量の経年変動を考慮した速度回復誘導灯設置効果の分析, 3(2), A_92–A_100, 2017.
- 6) 増本裕幸, 飛ヶ谷明人, 兒玉崇, 北澤俊彦, 鈴木健太郎, 友枝ゆかり, 李竜煥: 阪神高速道路における速度回復誘導灯の効果検証と効率的な運用方法について, 交通工学論文集, 4(3), B_1–B_9, 2018.
- 7) 佐藤久長, 西田匡志, 柏木悠, 櫻井光昭, 青木隆志: スピーカーを用いた音声案内による速度回復情報提供の効果分析, 土木学会論文集D3(土木計画学), 77(1), 1–11, 2021.
- 8) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一: 高速道路サグ部渋滞対策に資するACCの将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集, 1(2), B_60–B_67, 2015.
- 9) Goni-Ros, B., Knoop, V.L., Takahashi, T., Sakata, I., van Arem, B., Hoogendoorn, S.P.: Optimization of traffic flow at freeway sags by controlling the acceleration of vehicles equipped with in-car systems, *Transportation Research Part C*, 71, 1–18, 2016.
- 10) Goni-Ros, B., Schakel, W.J., Papacharalampous, A.E., Wang, M., Knoop, V.L., Sakata, I., van Arem, B., Hoogendoorn, S.P.: Using advanced adaptive cruise control systems to reduce congestion at sags: An evaluation based on microscopic traffic simulation, *Transportation Research Part C*, 102, 411–426, 2019.
- 11) Koshi, M., Kuwahara, M., Akahane, H.: Capacity of sags and tunnels on Japanese motorways. *ITE Journal*, 62, 17–22, 1992.
- 12) Jin, W. L.: Kinematic wave models of sag and tunnel bottlenecks. *Transportation Research Part B*, 107, 41–56, 2018.
- 13) Wada, K., Martinez, I., Jin, W. L.: Continuum car-following model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part C*, 113, 260–276, 2020.

- 14) 和田健太郎, 大口敬, 邢健: 連続体交通流理論に基づく高速道路サグ部における Capacity Drop 現象の実証分析, 生産研究, 72(2), 165–171, 2020.
- 15) Newell, G.F.: A simplified car-following theory: a lower order model, *Transportation Research Part B*, 36, 195—205, 2002.