

連続体交通流理論に基づく追従モデルによる Capacity Drop 現象の再現

甲斐 慎一郎¹・和田 健太郎²・堀口 良太³

¹正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 3-10)
E-mail:kai@i-transportlab.jp

²正会員 博士(情報科学) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail:wadaken@sk.tsukuba.ac.jp

³正会員 博士(工学) 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 3-10)
E-mail:rhoriguchi@i-transportlab.jp

高速道路サグ部での交通集中による渋滞は、渋滞発生後に捌け交通量が低下する Capacity Drop (CD) 現象により損失が増加することが知られている。この CD 現象を再現するモデルとして、Wada et al. (2020) は「地点依存の速度-車頭時間関係」と「有界加速度 (BA: Bounded Acceleration) モデル」を考慮した連続体交通流モデルを提案している。しかし、車両の離散化表現には課題があり、自動運転技術の効果評価のような個々の車両レベルの施策評価への適用に限界があった。本研究は、連続体交通流理論の考え方にに基づくミクロ交通流シミュレーションモデルを開発し、計算機実験を通してその性能を検証した結果を報告する。

Key Words: capacity drop, car following model, sag, traffic simulation, autonomous driving

1. はじめに

高速道路のボトルネックにおける交通集中による渋滞では、渋滞発生後に捌け交通量が低下する Capacity Drop (CD) という現象が生じる¹⁾。石田ら²⁾の研究によると、全国 52 箇所のボトルネックを対象に、全時間帯かつ無降雨日の交通容量を算定したところ、渋滞発生後捌け交通量は渋滞発生時交通量の 0.78~0.98 倍となることが報告されている。

渋滞発生後の捌け交通量の低下は、渋滞継続時間を長引かせ、結果として多大な遅れをもたらすため、高速道路会社においては、対策として、速度早期回復促す注意喚起表示板や走光型視線誘導システム (ペースメーカーライト、エスコートライト等の呼び名がある) が国内各地のボトルネックに導入されており、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³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。このような現象に至る要因としては、「渋滞延伸に伴い渋滞巻き込まれ時間が長くなるため、運転手が疲労し追従車間時間が長くなり、捌け交通量が低下する」(p.154, 交通容量データブック 2006⁷⁾) という説明が実務的にはされている。

これについて Jin⁸⁾および Wada et al.⁹⁾は、「地点依存の速度-車頭時間関係」と「有界加速度 (BA: Bounded

Acceleration) モデル」を考慮した連続体交通流モデルにより、CD 現象が再現できることを明らかにした。和田ら¹⁰⁾¹¹⁾では、この理論の実証を進めるとともに、交通制御と CD との関係についても分析を行っており、前述の各種施策の効果を論理的に裏づけることにも成功している。しかし、このモデルはあくまで連続体モデルであり、またその離散化表現には課題があり、自動運転技術の効果評価のような個々の車両レベルの施策評価への適用に限界があった (和田ら¹¹⁾が行なったように一定程度の分析は可能である)。

近年、ACC や自動運転技術により高速道路サグ部における渋滞の削減およびそれによる CO₂排出量の削減効果に期待が寄せられており、このような技術が普及した場合の渋滞削減効果のシミュレーションなども行われている¹²⁾¹³⁾。シミュレーションモデルでサグ部渋滞を表現する場合、メソモデルでは捌け交通量と渋滞発生後捌け交通量をそれぞれパラメータとして設定しておき、一定の継続時間後に適用して表現するなどの事例¹⁴⁾が存在するが、車両 1 台 1 台を動かす追従型のミクロシミュレーションにおいては、道路勾配を考慮するロジックは存在すれ¹²⁾¹⁵⁾¹⁶⁾ど、CD 現象の再現性を検証した事例は無いものと推測される。

本研究では、連続体交通流理論の考え方に基づくミク

ロ交通流シミュレーションモデルを開発し、計算機実験を通してその性能を検証することを目的とする。

2. 追従モデルを用いた連続体交通流理論の再現

(1) 使用する追従モデル

マイクロ交通流シミュレーションモデルの追従モデルに用いたのは、Schakel et al.¹⁷⁾による IDM+ (Intelligent Driver Model+)である。基となる Treiber et al.¹⁸⁾の IDM と比較すると、場合分けにより単独加速挙動と追従挙動を別々の式で動かすことにより、Fundamental Diagram (以下 FD) を厳密に再現することができるという特徴がある。また、副次的な特徴として、シミュレーターで個車を動かす際に、単独加速状態と追従状態の判別が容易になるといった利点がある。

IDM+のモデル式は、式(1)のように表現される。

$$\frac{dv}{dt} = a \cdot \min \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4, 1 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$$

ここで、

- a : 最大加速度 (m/s²)
- b : 希望減速度 (m/s²)
- v_0 : 希望速度 (m/s)
- v : 現在速度 (m/s)
- Δv : 前車との相対速度 (m/s)
- s_0 : 最小車頭距離 (m)
- s : 車頭距離 (m)
- T : 安全車頭時間 (s)

である。

(2) シミュレーションモデルの構築

次に、IDM+を用いたシミュレーションモデルを構築する。ここでは、純粹に追従挙動の評価が行えるよう、車線変更等は考慮しないシンプルなモデルを構築した。また、初期状態に関しても、交通流率を基に車頭距離が等間隔になるように配置し、定常状態から開始できるようにした。

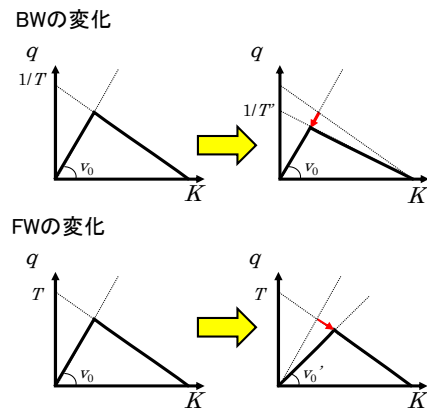


図-1 BW速度の変化とFW速度の変化

表-1 シミュレーションパラメータの共通設定

パラメータ	値	備考
v_0 (希望速度)	75km/h (=20.83m/s)	FW速度変化モデルではLの間に60km/hまで低下
T (車間時間)	1.5s	BW速度変化モデルではLの間に2.1sまで増加
L_0 (平坦区間)	5,000m	
L (FD変化区間)	1,500m	5,000m-6,500m地点に設定
L'	2,000m	6,500m-8,500m地点に設定
l (車長)	5m	
K (密度)	140veh/km	
Q (需要)	1,953veh/h	
s_0 (最小車頭距離)	2.14m	$1/K - l = 7.14 - 5 = 2.14$ mより
s_1 (定常状態の車頭距離)	38.4m	$75\text{km/h} / 1,953\text{台} = 38.4$ mより
θ (上り勾配)	1.318度	2.3%に相当

(3) 連続体交通流理論の反映方法

次に、IDM+に、Wada et al.⁹⁾の連続体交通流理論を反映させる方法を検討する。ここでは、FDについて、減速波により最小車間時間が変化する Backward Wave (BW) 速度を外生的に変化させ、CD現象が生じるか否かを考察した。FDの変化のさせ方としては、走行車両の希望速度が低下する Forward Wave (FW) 速度の変化も考えられるため、こちらも合わせて実験した (図-1)。

(4) シミュレーションの実施

a) シミュレーション条件

続いて、シミュレーションを実施する。シミュレーション条件は、Wada et al.⁹⁾が対象にした小仏トンネル再現パラメータを参考に設定した。各シミュレーションに共通のパラメータを表-1に示す。また、この条件での

表-2 連続体交通流理論による理論値

名称	値
C ₁ (最大交通量)	1,953 veh/h
C ₂ (ボトルネック容量)	1,474 veh/h
C ₋ (渋滞後の捌け交通量)	1,325 veh/h

連続体交通流理論による最大交通量, ボトルネック容量, および渋滞安定中の捌け交通量の理論値を表-2に示す.

b) BW 速度を変化させた場合

まず, BW 速度を変化させた場合のシミュレーションを行う. ここでは, 最大加速度 $a=0.312\text{m/s}^2$, 希望減速度 $b=0.312\text{m/s}^2$ とし, 車間時間 T を勾配区間において $1.6\text{ s} \rightarrow 2.1\text{ s}$ に変化させた結果をに図-2 示す.

図-2 について, 6,500m 地点の流率を確認すると, $C_{\min} = 1,462\text{ veh/h}$ と表-1 の理論値 $C=1,325\text{ veh/h}$ よりは高いものの, CD 現象が発生していることが確認できる. また, BN 下流端 (6,500m 地点) で追従と加速が切り替わるという点も, 連続交通流理論と整合する結果である. すなわち, 連続体交通流理論で示唆されている CD のメカニズムがここでも同様に働いていることが推察される. このほか, 特徴的な現象として, 発生車両の最後の方で 4,000m 以下の地点において追従車両の速度の加減速のうねり (BN 上流での粗密波) が確認される. うねりのような交通流の不安定性は連続体交通流モデルでは表現できず, 追従モデルで CD 現象を再現した場合の一つの特徴と言える.

次に, 最大加速度のみ $a=0.400\text{m/s}^2$ に変更した結果を図-3 に示す. $C_{\min} = 1,545\text{ veh/h}$ と高くなり, 加速度を大き

くすると C_{\min} も高くなるという連続体交通流理論と整合する. 一方で, 前述の追従車両の速度うねりが見られなくなっている.

今度は反対に, 最大加速度 $a=0.312\text{m/s}^2$, 希望減速度 $b=0.400\text{m/s}$ と希望減速度の方を大きくしたケースを図-4 に示す. $C_{\min} = 1,399\text{ veh/h}$ と表 1 の理論値 $C=1,325\text{ veh/h}$ に近づいている. また, 3,500m 地点より手前で大きな速度のうねりが見られる. このようなうねりが実際の交通現象においても発生しているかどうかは今後検証が必要である.

以上より, IDM+に BW 変化を組み合わせることで, 定性的には連続体交通流理論と同様に CD を再現することができた. ただし, IDM+には連続体交通流理論にはない希望減速度というパラメータが存在し, 最大加速度との関係を踏まえた適切な設定が必要であるため, それは改めて検討する必要がある.

c) FW 速度を変化させた場合

続いて, FW 速度を変化させた場合のシミュレーションを行う. BW 速度を変化させた場合と同様に, 最大加速度 $a=0.312\text{m/s}^2$, 希望減速度 $b=0.312\text{m/s}^2$ とし, 希望速度 w を勾配区間で $75\text{km/h} \rightarrow 60\text{km/h}$ に変化させた結果を図-5 に示す.

図-5 のように, 希望速度は設定通り 60km/h まで低下するが, CD 現象は発生せず, 後続車両への影響も無い. ただし, 自由走行車両の上り坂区間での無意識の速度低下は現実には観測されているので, ブレークダウン現象など, 渋滞発生時の様相再現には, これに類似したモデリングが必要になると考えられる.

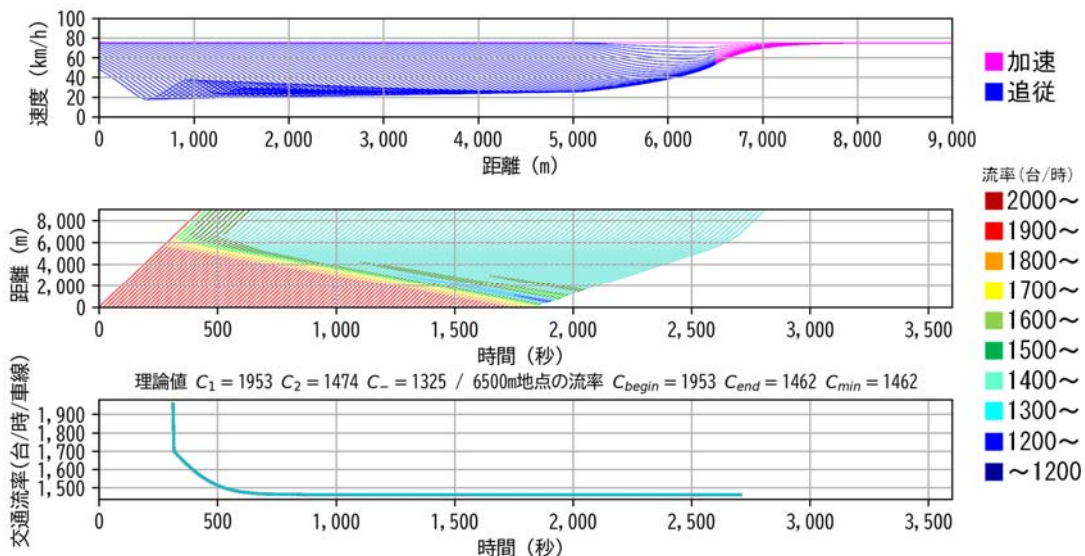


図-2 BW 速度を変化させた場合のシミュレーション 1 ($a = 0.312\text{m/s}^2$, $b = 0.312\text{m/s}^2$)

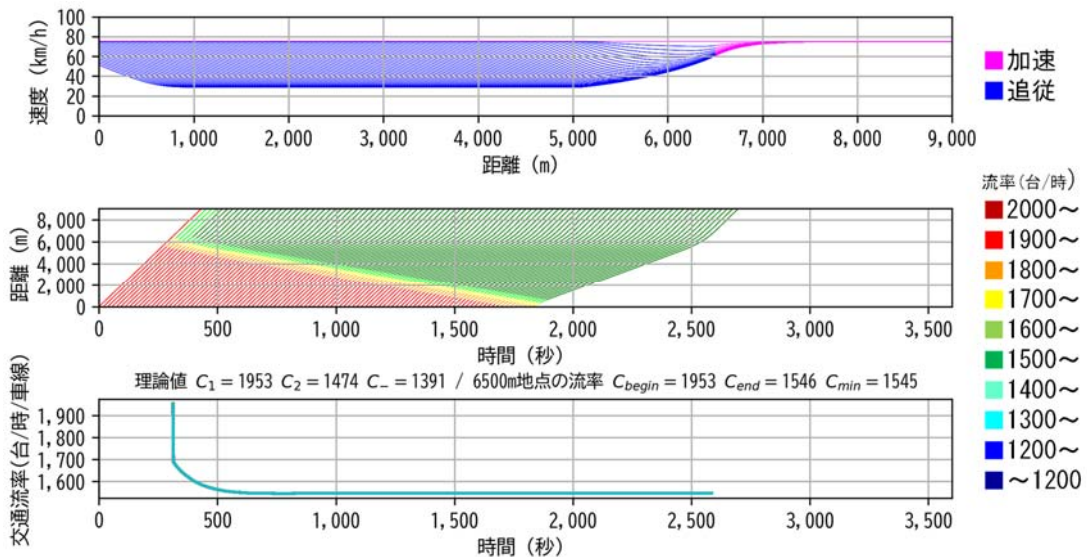


図-3 BW速度を変化させた場合のシミュレーション2 ($a = 0.400\text{m/s}^2$, $b = 0.312\text{m/s}^2$)

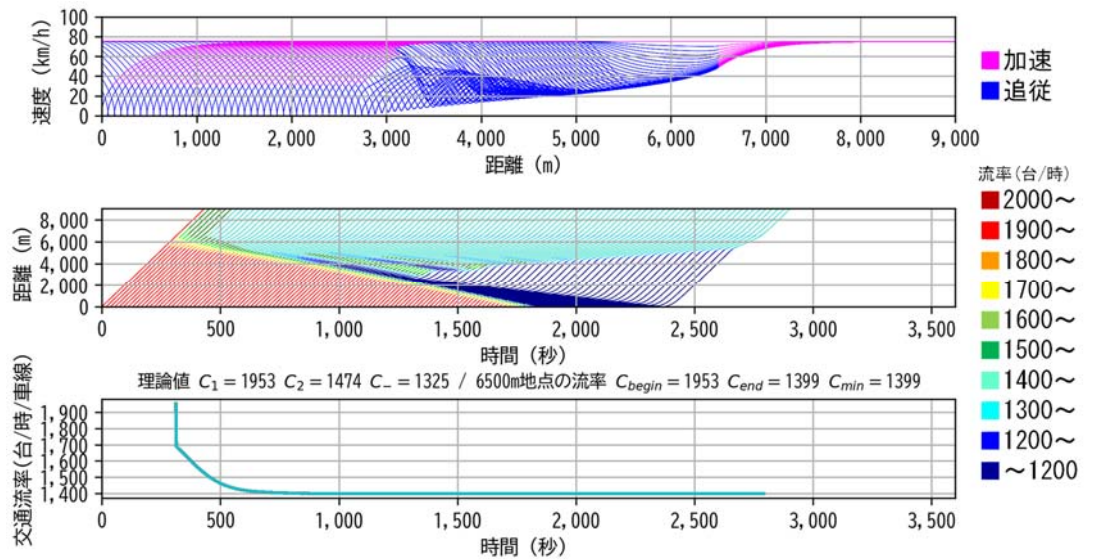


図-4 BW速度を変化させた場合のシミュレーション3 ($a = 0.312\text{m/s}^2$, $b = 0.400\text{m/s}^2$)

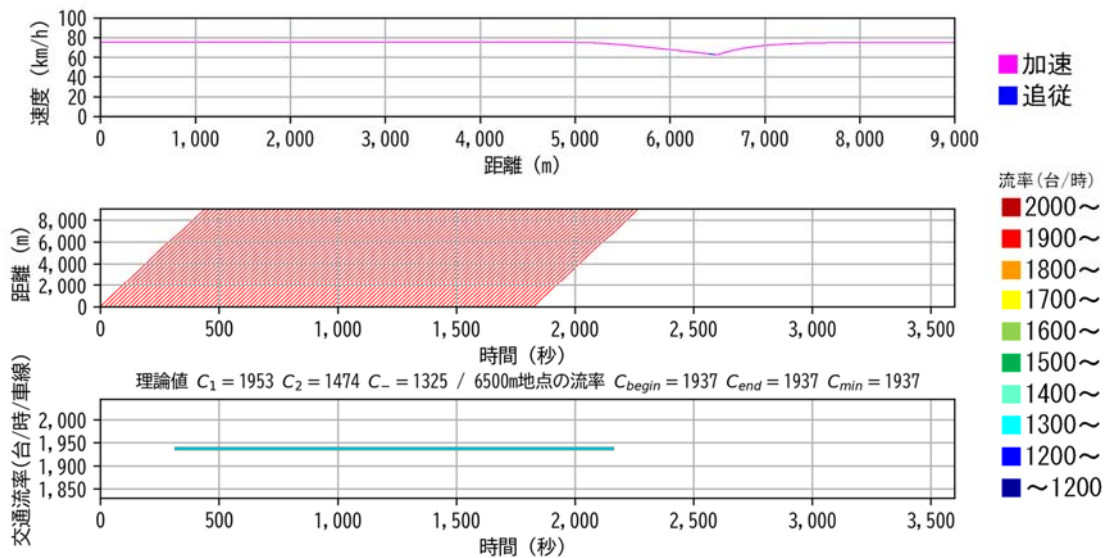


図-5 FW速度を変化させた場合のシミュレーション

3. 縦断勾配を考慮した追従モデルの検討

前節では、忠実に連続体交通流理論を反映させる (i.e., BW 速度を地点によって変化させる) ことによって、CD の再現を試みた。これに対して本節では、前節のように FD 変化を外生的に与えるのではなく、従来型のサグ・ボトルネックのモデリングのように、勾配の影響を内生化することによって CD が再現されるか否かを検討する。ここでは、IDM+モデルの加速項に登坂時の重力加速度を差し引く項を追加し、先頭車両においても速度低下が表現できる追従モデルを検討した。式(2)にモデルの式を示す。

$$\frac{dv}{dt} = a \cdot \min \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4, 1 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] - g \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$$

ここで、 g は重力加速度 (9.8m/s^2)、 θ は勾配 (度) で、それ以外の変数は式 (1)と同じである。なお、 θ は上り勾配のみを考慮し、 $\theta < 0$ の場合は $\theta = 0$ とする。シミュレーション対象は第2節と同様の区間とするが、FD変化区間に替えて勾配区間を設け、 L ($5000\text{m}-6500\text{m}$)で $0\% \rightarrow 2.3\%$ に、 L' ($6500\text{m}-800\text{m}$)で $2.3\% \rightarrow 0\%$ にすりつけた。

このモデルを用いて、最大加速度 $a=0.312\text{m/s}^2$ 、希望減速度 $b=0.312\text{m/s}^2$ とした場合の計算結果を図-6に示す。図-6を見ると、最大加速度 a と希望減速度 b を同じ値にした場合では CD が過大に生じており、ボトルネック容量が過少に算定されている状態である。また、発生車両の最後の方で $3,500\text{m}$ 以下の地点において追従車両の速度の加減速のうねりが確認される。

次に、最大加速度 $a=0.400\text{m/s}^2$ 、希望減速度 $b=0.312\text{m/s}^2$ と最大加速度の方をやや大きくして算定することとした。その結果を図-7に示す。図-7では、図-6と比較して改善はされたものの、ボトルネック容量が過少に算定されている状況は続いている。これは、重力加速度の影響によ

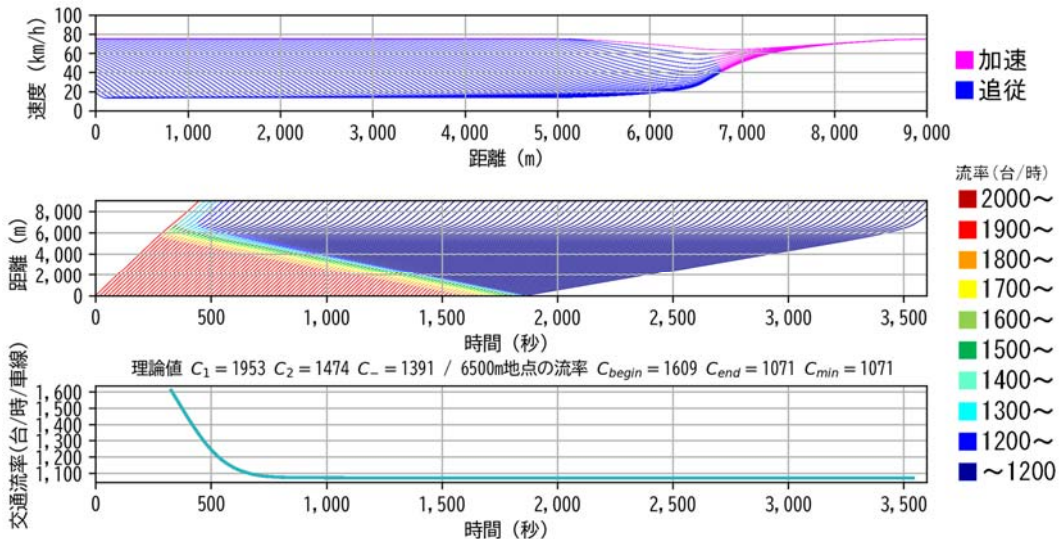


図-6 縦断勾配を考慮した場合のシミュレーション1 ($a = 0.312\text{m/s}^2$, $b = 0.312\text{m/s}^2$)

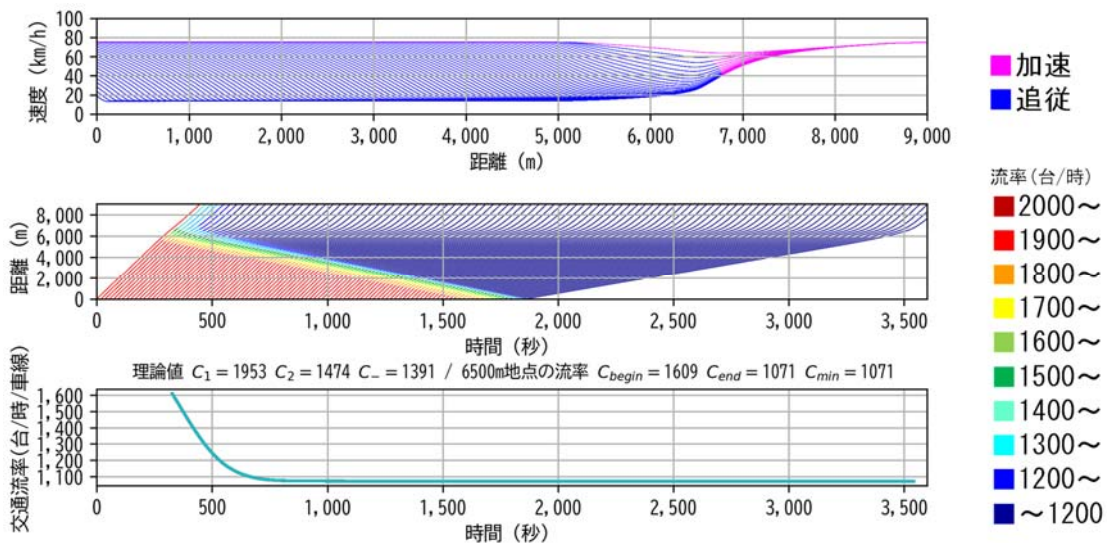


図-7 縦断勾配を考慮した場合のシミュレーション2 ($a = 0.400\text{m/s}^2$, $b = 0.312\text{m/s}^2$)

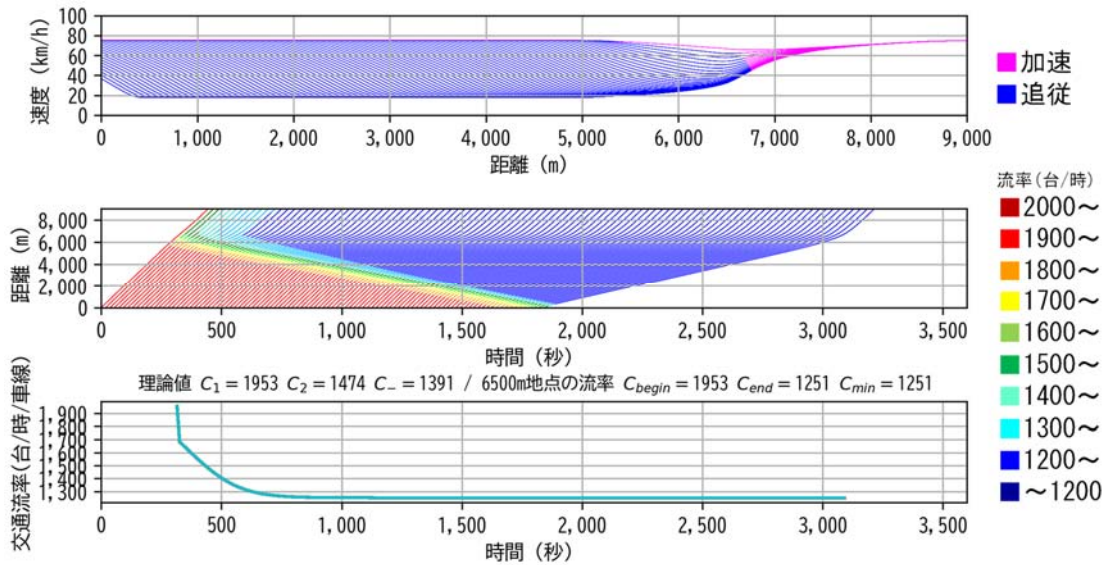


図-8 縦断勾配を考慮した場合のシミュレーション3 ($a = 0.400\text{m/s}^2$, $b = 0.312\text{m/s}^2$, $G = 0.85$)

る影響が大きすぎることが理由と考えられ、影響を調整するためのパラメータが必要であると考えられる。そこで、重力加速度を差し引く項にゲインパラメータを掛けたものが式(3)である。

$$\frac{dv}{dt} = a \cdot \min \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4, 1 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] - g \cdot \sin\theta \cdot G \quad (3)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$$

式(3)を用いて、最大加速度 $a=0.400\text{m/s}^2$ 、希望減速度 $b=0.312\text{m/s}^2$ 、ゲインパラメータ $G=0.85$ として算定した結果を図-8に示す。図-8では、CD現象によるボトルネック容量の値が、連続体交通流理論の理論値に近い値になる結果となった。速度のうねりについては、図-7の段階から見られていない。

以上より、IDM+モデルに登坂時の重力加速度を差し引く項を加えることでCD現象を考慮した縦断勾配を考慮した追従モデルを構築することができた。しかし、最大加速度、希望減速度のパラメータの適切な設定については2節でBW速度を変化させた場合と同様に検討が必要であり、重力加速度のゲインパラメータについても検討する必要がある。また、追従モデルでCD現象を再現した場合の特徴であるうねりが図-7、図-8では見られなくなってしまい、実際の交通現象との比較検証を行っていく必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、連続体交通流理論の考え方に基づくミクロ交通流シミュレーションモデルを開発し、計算機実験を通してその性能を検証した。その結果、IDM+にBW速度の変化を考慮したモデルを構築することで、連続体交通流理論と比較して速度のうねりなどの微視的な挙動を表現可能なモデル構築することができた。また、IDM+モデルにゲイン付きで登坂時の重力加速度を差し引く項を加えたモデルを構築することで、先頭車のサグによる無意識の速度低下の表現も含めたCD現象が生じる追従モデルを考案することができた。

今後の課題としては、各節にも記載した通り、実際の交通現象との比較による最大加速度、希望減速度、重力加速度のゲインパラメータの適切な設定が挙げられる。

参考文献

- 1) 越正毅, 1986. 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, IV-5 (371), 1-7.
- 2) 石田貴志, 野中康弘, 大口敬: 高速道路における交通容量, 土木計画学研究発表会・講演集, 53, 1804-1810, 2016.
- 3) 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.
- 4) 塩見康博, 北村彩菜: 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.
- 5) 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.

- 6) 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.
- 7) 交通工学研究会 (編): 交通容量ハンドブック 2006, 丸善, 2006.
- 8) Jin, W.-L.: Kinematic wave models of sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part B*, 107, 41–56, 2018.
- 9) Wada, K., Martainez, I., Jin, W.-L.: Continuum carfollowing model of capacity drop at sag and tunnel bottlenecks, *Transportation Research Part C*, 113, 260–276, 2020.
- 10) 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.
- 11) 和田健太郎, 甲斐慎一郎, 堀口良太: 単路部ボトルネックにおける Capacity Drop を低減する走行挙動: 連続体交通流理論に基づく一考察, 交通工学研究発表会論文報告集, 41, 511–517, 2021.
- 12) 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.
- 13) Horiguchi, R. and Oguchi, T.: A study on car following models simulating various adaptive cruise control behaviors, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 12, 127–134, 2014.
- 14) 平井章一, Jian XING, 高橋亮介, 堀口良太, 白石智良, 小林正人: 都市間高速道路ネットワークを対象とした交通流シミュレーションの開発, 土木計画学研究発表会・講演集, 50, 49 (CD-ROM), 2014.
- 15) 中井万理子, 塩見康博: ミクロ交通流シミュレータ VISSIM による高速道路サグ部渋滞現象再現性の定性評価, 土木計画学研究発表会・講演集, 58, 2018.
- 16) Goñi Ros, B., Knoop, V.L., Shiomi, Y., Takahashi, T., van Arem, B., Hoogendoorn, S.P.: Modeling traffic at sags, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 14, 64–74, 2016.
- 17) Schakel, W., Arem, B., Bart, N.: Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability, in *Proceedings of 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, 759–764, 2010.
- 18) Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, 62(2), 1805–1824, 2000.

(2021. 10. 1 受付)