

合流部における交通渋滞シミュレーションについて

井口 智彦[†] 脇田 祐希子[†] 清水 光輝[†]
玉城 龍洋^{††} 北 栄輔[†]

本研究では、車両追従モデルを用いて、高速道路合流部における交通渋滞シミュレーションを行う。一般的な追従モデルは直前の車両のみに応答して加減速を行うが、本研究のモデルは前方3台の車両に応答する多追従モデルである。シミュレーションにおいて、車両が多追従モデルに従って速度を決定することで、交通渋滞を緩和できることを示す。

Simulation of Traffic Congestion at Emerging Point of Highways

TOMOHIKO IGUCHI,[†] YUKIKO WAKITA,[†] HIKARU SHIMIZU,[†]
TATSUHIRO TAMAKI^{††} and EISUKE KITA[†]

This paper describes the simulation of traffic congestion at the emerging point of two roads. In the traditional car-following model, a vehicle behaves the distance from the nearest-forehand vehicle alone. In the car-following model of this paper, a vehicle behavior depends on the distances from the first, second and third nearest forehand vehicles, which is called as multi car-following model. The simulation results show that the traffic congestion can be reduced if the vehicle behavior depends on the multi car-following model.

1. 緒 論

交通渋滞の原因には様々な理由があるが、その中で道路構造に起因する渋滞を自然渋滞とよぶ。自然渋滞の原因としては、サグ、カーブ、トンネル、合流などがある。本研究では合流部における渋滞に着目する。合流部における渋滞に関する研究は既にいくつか行われている。西らは、合流区間の一部に区画線を引き、本線走行車両と、合流レーン走行車両を交互に配置させることで、区画線通過後は、ジッパー合流が実現できることを提案している¹⁾。しかし、合流時には、車間距離が急激に狭くなり、合流部直前の車両は速度を落とし、後方車両にも大きな影響を与えるものと考えられる。

本研究では、合流車両による後方車両への影響を小さくすることで、滑らかに速度変移させ、安定流への復帰を早めることを目的とする。まず、車両の行動は追従モデルに依存すると考える。追従モデルとは、前方を走る車両に応答して、速度を決定するモデルである²⁾。本研究では、そのうちの一つである Bexelius モデル³⁾に注目する。本来の Bexelius モデルは1台前

の車両との相対速度によって自車両の速度を変更する。これを3台前までの車両をみるように改良し、拡張 Bexelius モデルと名付ける。この改良モデルを適用することで、合流車両に複数の後方車両が応答し、スムーズな速度遷移を行うことができると考えられる。その結果として、合流部における渋滞の緩和が実現できることを考察する。

2. 安定性解析

2.1 Bexelius モデル

1968年に Bexelius が以下のモデルを提案している³⁾。

$$\ddot{x}_n(t+\tau) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot \{\dot{x}_{n-i}(t) - \dot{x}_n(t)\} \quad (1)$$

ここで、時間 t での車両 n の位置を $x_n(t)$ と示す。これを図1に示す。従って、 $\ddot{x}_n(t)$ は車両の加速度となる。 N は相対速度の変化を考慮する前方車両の台数を示す。 i は前方車両との番号差を表す。このモデルでは、複数の前方車両との相対速度 $\dot{x}_{n-i}(t) - \dot{x}_n(t)$ に応じて加速度が変化するようにモデル化されている。

2.2 拡張 Bexelius モデルにおける安定性解析

拡張 Bexelius モデルは以下の式で表される。

[†] Nagoya University, Graduate School of Information Sciences

^{††} Ube National College of Technology

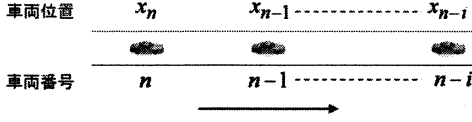


図1 車両の位置関係

$$\begin{aligned} \dot{x}_n(t+\tau) = & k_1 \cdot \{\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)\} \\ & + k_2 \cdot \{\dot{x}_{n-2}(t) - \dot{x}_n(t)\} \\ & + k_3 \cdot \{\dot{x}_{n-3}(t) - \dot{x}_n(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 τ は遅れ時間、 k_i は感受率である。

式(2)において、平衡状態 $x = x_0$ を考え、その辺りの微小なズレ \bar{x}_n について考える。

$$\dot{\bar{x}}_n = x_0 + \bar{x}_n \quad (3)$$

式(3)を式(2)へ代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{x}}_n(t+\tau) = & k_1 \cdot \{\ddot{\bar{x}}_{n-1}(t) - \ddot{\bar{x}}_n(t)\} \\ & + k_2 \cdot \{\ddot{\bar{x}}_{n-2}(t) - \ddot{\bar{x}}_n(t)\} \\ & + k_3 \cdot \{\ddot{\bar{x}}_{n-3}(t) - \ddot{\bar{x}}_n(t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)の解として次式がある。

$$\ddot{\bar{x}}_n(t) = A_n \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (5)$$

式(5)を式(4)へ代入すると、次の四項間漸化式を得る。

$$A_n = \frac{C_1}{z_1^n} + \frac{C_2}{z_2^n} + \frac{C_3}{z_3^n} \quad (6)$$

ここで、 C_1, C_2, C_3 は定数である。

式(6)より、 $n \rightarrow \infty$ において $A_n \rightarrow 0$ を満たすためには、全ての ω において、 $|z_i| > 1$ が必要である。そこで、 $|z_i| > 1$ を満たすようなパラメータ k_1, k_2, k_3, τ について考える。また、計算の簡略化のため、一次までのテイラー展開により、

$$e^{i \cdot \omega \cdot \tau} \approx 1 + i \cdot \omega \cdot \tau \quad (7)$$

と近似する。

式(2)において、 k_1, k_2, k_3 は各前方車両に対する感受率を表す。そこで、 k_1, k_2, k_3 に関して、以下の条件をおく。

$$k_1 \geq k_2 \geq k_3 \quad (8)$$

式(8)を満たすように k_1, k_2, k_3, τ を以下の値にとることにする。

$$k_1 = 0.15, k_2 = 0.10, k_3 = 0.06, \tau = 1.0 \quad (9)$$

この時、全ての ω に対して $|z_i| > 1$ を満たしていることが確認できている。つまり、上記の値を取る時、拡張 Bexelius モデルは安定である。

2.3 追従モデルにおける安定性解析

拡張 Bexelius モデルとの比較として、次式の追従モデルを用いる⁴⁾。

$$\ddot{x}_n(t+\tau) = k \cdot \{\ddot{x}_{n-1}(t) - \ddot{x}_n(t)\} \quad (10)$$

先の場合と同様にして、このモデルの安定性解析を行う。式(10)において、平衡状態 $x = x_0$ を考え、その辺りの微小なズレ \bar{x}_n について考えると次式を得る。

$$\ddot{\bar{x}}_n(t+\tau) = k \cdot \{\ddot{\bar{x}}_{n-1}(t) - \ddot{\bar{x}}_n(t)\} \quad (11)$$

式(11)の解

$$\ddot{\bar{x}}_n(t) = A_n \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (12)$$

を式(11)へ代入すると次式を得る。

$$A_n = C \cdot \left(\frac{k}{k + i \cdot \omega \cdot e^{i \cdot \omega \cdot \tau}} \right)^n \quad (13)$$

ここで、 C は定数である。式(13)より、 $A_n \rightarrow 0$ を満たすためには、全ての ω において、

$$\left| \frac{k}{k + i \cdot \omega \cdot e^{i \cdot \omega \cdot \tau}} \right| < 1 \quad (14)$$

を満たす必要がある。ここで、一次までのテイラー展開により、

$$e^{i \cdot \omega \cdot \tau} \approx 1 + i \cdot \omega \cdot \tau \quad (15)$$

と近似し、式(14)を展開すると、

$$\tau^2 \cdot \omega^2 + (1 - 2 \cdot k \cdot \tau) > 0 \quad (16)$$

となる。全ての ω において、式(16)を満たすためには、

$$2 \cdot k < \frac{1}{\tau} \quad (17)$$

を満たす必要がある。

ここで、遅れ時間 τ を拡張 Bexelius モデルと同じ1.0(秒)とすると、

$$k < 0.5 \quad (18)$$

また、拡張 Bexelius モデルにおける k_1, k_2, k_3 の和は、

$$k_1 + k_2 + k_3 = 0.31 \quad (19)$$

より、 k を以下の式で定義する。

$$k := k_1 + k_2 + k_3 \quad (20)$$

このモデルでは、前方1台の車両にのみ応答する形となっている。以下ではこのモデルを追従モデルと呼ぶことにする。

3. 交通シミュレーション

3.1 解析領域

本研究では、1車線の直線道路を対象にする。1セルは縦3(m)、横3(m)の道路を表している。車両は縦3(m)、横6(m)となっている。これを1000個一列に並べれば、3000(m)の道路を表していることになる。

3.2 確率速度法

従来の研究では1タイムステップで複数セルを移動するようにモデル化されており、交差点などの追いついてしまうなどの問題が生じやすい。この解決方法として、1タイムステップで最大1セルしか進まない確率速度法が提案されている⁷⁾。自車両の前方セルが空白の場合は以下のアルゴリズムを実現する。

(1) P_0 を次式で定義する.

$$P_0 = V/V_{max} \quad (21)$$

(2) 0 から 1 の範囲で、一様乱数 p_0 を発生させる.

(3) $p_0 < P_0$ を満たすとき、1 セル進む.

ここで V は車両速度を、 V_{max} はシミュレーション領域内で走行可能な車両の最大速度を表している. このように、参照すべきセルの範囲が狭くなることで、ローカルルールは簡化され、複雑な都市交通も容易に表現できるようになる.

3.3 安全車間距離

各車両は前方車両と一定の車間距離を保つと仮定する. この車間距離を安全車間距離と呼ぶ. 安全車間距離 G_s は速度 v に対して必要とされる理想的な車間距離を意味している. 本研究では、参考文献⁶⁾ に従い、以下の式で安全車間距離 G_s を求める.

$$G_s = 0.0029 \cdot v^2 + 0.3049 \cdot v \quad (22)$$

3.4 ローカルルール

車両の移動はローカルルールにより定義される. 車両の移動に対するローカルルールの適用は以下のものである. ここで、1 タイムステップは 0.1 秒である.

- (1) $t \leftarrow 0$
- (2) 車両を配置する.
- (3) $t \leftarrow t + 1$
- (4) 車間距離を測定する.
- (5) 安全車間距離を計算する.
- (6) 速度ローカルルールを適用する.
- (7) 確率速度モデルに従って移動するかどうかを決定する.
- (8) t がシミュレーション終了時間 T より小さければ 3 へ戻る.

3.4.1 速度ローカルルール

全ての車両は 1 タイムステップごとに速度を更新する. 近傍セルの状態によってルールは分かれる. 以下に、絶対減速ルールと相対加減速ルールを述べる.

3.4.1.1 絶対減速ルール

近傍セルに障害物などの停止物がある場合と、安全車間距離 G_s 内に存在する前方の車両がブレーキランプを点灯させている場合、車両は式 (5.2) に従い、速度 v を減速させる.

$$v = v - v/G \quad (23)$$

3.4.1.2 相対加減速ルール

拡張 Bexelius モデルに従い、速度を決定する. ただし、参照セルは 200 セル (600m) としている. 参照セル内に車両が存在しない場合は、加速度 $2.4(\text{m}/\text{sec}^2)$ で加速する.

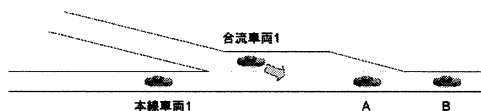


図 2 合流図

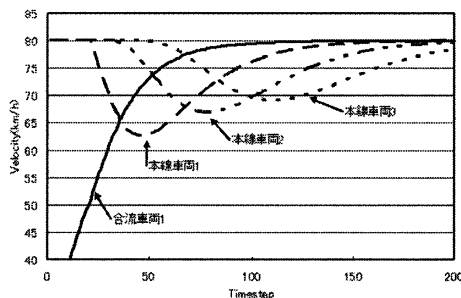


図 3 ケース 1(追従モデル)

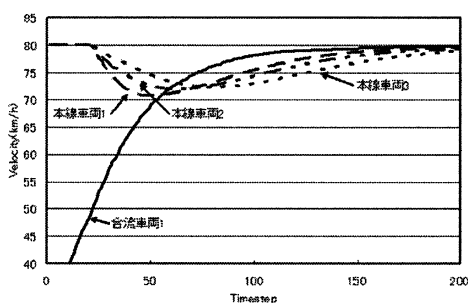


図 4 ケース 1(拡張 Bexelius モデル)

4. 解析例

本研究では、合流部における流入車両に対して、複数の後方車両が応答することで、合流部の渋滞が緩和されることを検証する. 本線は最高時速 80(km), 合流車線は最高時速 50(km) と設定する. 拡張 Bexelius モデルにおいて、速度を決定するために、3 台前までの車両を参照する.

4.1 ケース 1

最初に、図 2 において合流車両の 1 台後方を走行する本線車両 1 からみて、本線を走行する車両 A, B の次に、合流車線から車両が流入する場合を考える.

図 3 と図 4 に、合流後の速度遷移を示す. 図 3 において、合流車両 1 の流入によって、本線車両 1, 2, 3 が順次大きく速度を減少させていることが分かる. それに対し、図 4 においては、合流車両 1 の流入に対し

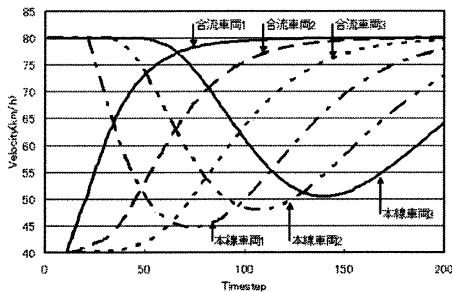


図5 ケース2(追従モデル)

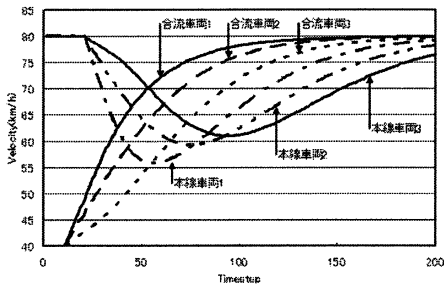


図6 ケース2(拡張 Bexelius モデル)

て、3台が同時に応答し、速度をある程度大きく保ったまま、安定流に遷移していることが分かる。

4.2 ケース2

次に、本線車両1の前方に3台の車両が合流する場合を考える。合流のタイミングは、同じタイムステップで起こるとしている。合流後の速度遷移を図5と図6に示す。

先とどのように拡張 Bexelius モデルに従うことで、より早く安定流に遷移できていることが分かる。

5. 結 論

本研究では、合流部における渋滞の緩和を目的とし、多追従モデルの有効性に関して、セルオートマトンを用いて検証した。従来の追従モデルは、多くが直前の前方車両にのみ応答するモデルであった。これに対して、本研究では前方3台の車両に反応する拡張 Bexelius モデルを示し、その安定性解析を行ってパラメータを設計した。

解析例において、追従モデルと拡張 Bexelius モデルに従う車両の挙動に関して、一車線の車両列の中に、恣意的に車両を合流させることで、後方車両が受ける影響を比較した。拡張 Bexelius モデルに従うことで、

合流時の攪乱からより早くに安定流に復帰できることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 西 遼佑. 織込部交通流の交互配置化の Simulation および Cluster 解析, 交通流のシンポジウム 論文集, Vol.14, pp.89-92, 2008.
- 2) 杉山雄規. 交通流の物理. ながれ, Vol.22, pp.95-108, 2003.
- 3) S. Bexelius. An extended model for car-following. *Transportation Research*, Vol.2, pp.13-21, 1968.
- 4) R.Chandler, R.Herman, and W.Montroll. Traffic dynamics ; studies in car-following. *Operation Research*, Vol.6, pp.165-184, 1958.
- 5) O. Biham, A. Middleton, and D. Levine. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Physical Review A*, Vol.46, No.10, pp.6124-6127, 1992.
- 6) 安江里佳, セル・オートマトンによる都市交通シミュレーション. 名古屋大学修士論文, 2003 年度.
- 7) 玉城龍洋, セル・オートマトンによる都市交通シミュレーション. 名古屋大学博士論文, 2004 年度.