

希望速度を考慮したモデルによる渋滞波及現象のシミュレーション*

Simulation of congestion diffusion by car-following model with desired speed*

王興拳** 宮城俊彦***

By Xingju WANG** · Toshihiko MIYAGI***

1. はじめに

高速道路における渋滞状況は一日の時間帯毎に渋滞箇所と渋滞延長が刻々と変化している。本質的に非定常であるこのような渋滞の改善に向けた様々な施策を厳密に評価するために交通渋滞の延伸や時々刻々と変化する交通渋滞を表現することのできる動的な交通流シミュレーションモデルが必要となる。高速道路合流部の渋滞現象の特性を、運転挙動モデルに基づくシミュレーションを用いて再現できれば、合流部の必要性の検討、合流部容量を増強する道路設計、既存の合流部の渋滞緩和・解消を目的とする交通運用手法、根本的な渋滞対策を検討することができよう。¹⁻³⁾

本論文は Helbing によって、提案された IDM (Intelligent Driver Model) を Java によってプログラムし、交通流シミュレーターとして機能させることを主たる目的としている。また、合流部での割り込みや 2 車線道路での追い越し現象を表現するために車線変更モデルを提案している。割り込みモデルを組み込んだ IDM について、いくつかの交通状況を想定した交通シミュレーションを実施し、Helbing 指摘する localized clusters と呼ばれる交通流の不安定な状況と Homogeneous congested traffic と呼ばれる渋滞が空間的に伝播する状況をシミュレーションで示す。

2. 追従理論に関する既存の研究

*キーワード: 交通流、交通制御、交通量計測、ITS

**地域修士、岐阜大学工学研究科

***正員、工博、岐阜大学地域学科部 教授

(岐阜市柳戸 1 - 1、TEL:058-293-3307)

Pipes は、前方車両との相対速度 ($\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n-1}(t)$) 刺激として、反応強度 α を介して出力加速度 $\ddot{x}(t)$ が決まるモデル構造を最初に提案した^{3,4)}。Chandler らは反応遅れ時間を導入し、Gazis, Herman らは、速度の影響を加え、一般式を作成した^{3,5)}。Newell は実測結果から、車頭距離を速度の指数関数としている。また、先行車が存在していない場合、あるいは交通渋滞の時には、運転者が維持しようとする最高速度になると考え、希望速度を導入した^{3,6,8)}。希望速度の概念は Prigogine によって提唱されたものである⁷⁾。Newell のモデルは、高密度領域では加速度が大きくなりすぎる傾向がある。この問題を解決するため、Helbing は Intelligent Driver Model を提案した。IDM を要約するとつぎのようである。

$$\dot{v}_n = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left(T v + \frac{v \Delta v}{2 \sqrt{ab}}, 0 \right) \quad (2)$$

$$s_n(t) = [x_{n-1} - x_n - l] \quad (3)$$

$$\Delta v_n(t) = [v_n(t) - v_{n-1}(t)] \quad (4)$$

ここで、 x : 基準点からの距離、 n : 第 n 番目の車両、 v : 速度、 l : 車両長さ、 s_0 : 最小車間距離、 a : 最大加速度、 b : 適当な減速度 ($a \leq b$)、 δ : 指数定数、 s^* : 有効車間距離 T : 渋滞時の走行反応時間

交通渋滞のときに、式(2)より、運転者は最小車間距離を保って、また、安全距離 $v_n T$ を加えて、走行している。自由流の場合 ($s_n \rightarrow \infty$) $\dot{v}_n = a [1 - (v_n / v_0)^\delta]$ となる。均衡交通の場合 ($\dot{v}_n = 0$ 、 $\Delta v = 0$) 運動者は均衡距離を保って、走行している。すなわち

$s_e(v) \approx s_0 + vT$ である。停止した車両が低速の車両に接近するときに、均衡項 $s_0 + vT$ を考えない。ブレーキ項 $-a(s^*/s_n)^2$ は車間距離に関する。すなわち $b_{\text{int}}(s, v, \Delta v) \approx (v\Delta v)^2 / (4bs^2)$ である。 Δv_n に比例した非均衡項は“正常”の状態に対応した減速度（知能ブレーキ）を表す。停止した車両に接近するとき、衝突事故しないため、最小運動減速度 $b_k = v^2 / (2s)$ が必要である⁸⁻¹⁰⁾。

3. 車線変更モデル

高速道路において、合流部挙動や織込み区間の合流挙動と避走挙動などのシミュレーションするため、車線変更モデルが必要になる¹¹⁻¹²⁾。合流する本線車とランプ車の速度、位置と心理的な要素より、合流車の挙動を追跡するに当たって、本論文では、自由合流と強制合流に分けたモデルを提案する。

自由合流というのはランプ車両、本線車両ともに相互に何の影響を受けずに合流する場合を指す。強制合流というのはランプ車線上の車両が加減速して本線の流れに強制されて入る場合である。車間距離、相対速度、ドライバーの心理的な要素についての急加減速度を考えた車線変更モデルは次のとおりである。

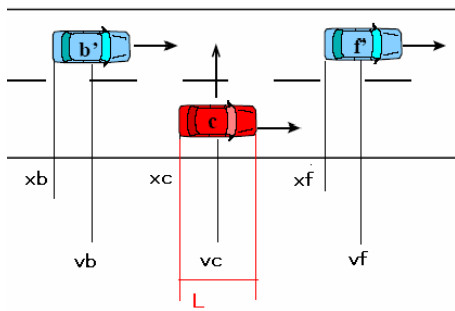


図1 車線変更挙動

$$f = x_f - x_c - L + (v_f - v_c)t + (-A + B)t^2 \geq 0 \quad (5)$$

$$b = x_c - x_b - L + (v_c - v_b)t + (A - B)t^2 \geq 0 \quad (6)$$

$$0 \leq A \leq a \quad (7) \quad 0 \leq B \leq b \quad (8)$$

f 、 b ：判断関数， x 、 v ：それぞれ車両の基準点からの距離、速度， L ：車両長， t ：判断時間あるいはシミュレーションの時間， A ：急加速度， a ：加速度の最大値 B ：急ブレーキ減速度， b ：最大急ブレーキ 上式において、 A 、 B は自由合流か強制合流かを決定するパラメータであり、排斥事象である。

図1に示すように、 f は車両 c が車両 f との車間距離を判断して割り込み挙動を制御する関数、また、 b は車両 c が後方車両 b をみて同様に判断する関数。

自由合流の場合、車間距離は大きいので、 A 、 B は共に0の値をとり、判断関数 f 、 b は常に成立する。強制合流の場合、式(5)、(6)、(7)及び(8)は不等式により、解が存在する時のみ、車線変更する。不等式の解が存在するかどうかを検討する。 A 、 B は互いに排斥事象であるから、次の(1)または(2)が生じる。

(1) A 事象が成立すると、 $B = 0$ になる場合、

$$x_f - x_b - 2L + (v_f - v_b)t > 0 \quad (9)$$

の時、解が存在しない。

$$x_f - x_b - 2L + (v_f - v_b)t \leq 0 \quad (10)$$

の時、また

$$(x_f - x_c - L + (v_f - v_c)t) / (-t^2) \geq 0 \quad (11)$$

及び $(x_c - x_b - L + (v_c - v_b)t) / t^2 \leq a \quad (12)$

をとる場合、解が存在する。

(2) B 事象が成立すると、 $A = 0$ になる場合

$$x_f - x_b - 2L + (v_f - v_b)t < 0 \quad (13)$$

の時、解が存在しない。

$$x_f - x_b - 2L + (v_f - v_b)t > 0 \quad (14)$$

の時、また

$$(x_f - x_c - L + (v_f - v_c)t) / (-t^2) \leq b \quad (15)$$

及び $(x_c - x_b - L + (v_c - v_b)t) / t^2 \geq 0 \quad (16)$

をとる場合、解が存在する。

(1) また(2)に示したような条件で解が存在する場合、車線を変更し、存在しない場合、待ち行列にはいる。

4. シミュレーションの構築

本論文において、合流部の合流、交差点での右左折などの方向変更、単路部の追い越し、車線変更、追従などの個別車両の挙動を扱うシミュレーションはすべてマイクロシミュレーションである。

(1) 道路の合流部と観測点の構築

図-2に示すように、主道路の長さは1000m、ランプの長さは200m、ランプの合流部の長さは100m、ランプと主道路の角度は 30° に設定してい

る。観測点の距離は基準点からの距離を表している。

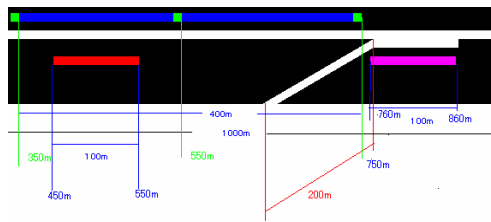


図-2 シミュレーションに用いる道路の構成

(2)パラメータ

パラメータは外部パラメータと内部パラメータに分けられている。内部パラメータというのは交通流モデルについてのものである。モデルに含まれるパラメータ以外は外部パラメータと呼んでいる。外部パラメータはミクロ交通流モデルに直接は影響を与えない。ただし、全体の交通システムについてのマクロ交通流特性に影響を与える。内部パラメータとして、追従モデルにおける時間遅れ、最大加減速度、最小車間距離などあるいは車線変更モデルについての最大加減速度などを表現するパラメータがある。外部パラメータとして、本線とランプ部の交通量を

表-1 シミュレーションのパラメータ

ケース	交通量の組合せ	本線流 (台/h)	ランプ流 (台/h)	合計 (台/h)
A	1	500	500	1000
	2	600	600	1200
	3	700	600	1300
	4	600	700	1300
	5	650	650	1300
B	1	1200	600	1800
	2	1000	800	1800
	3	1300	600	1900
	4	1200	800	2000
	5	1400	550	1950
C	1	1500	700	2200
	2	1500	900	2400
	3	1700	900	2600
	4	1700	700	2400
	5	1700	1000	2700

与える。表-1に示すように、その合計値が A、1300台/h以下、B、1800~2200台/h、C、2200~2700台/hの3ケースを設定している。それは、次節に示す自由流、強制合流における局所的不安定流れ及び不安定流れの状況に対応している。

5. シミュレーションの実行と結果

(1)自由合流

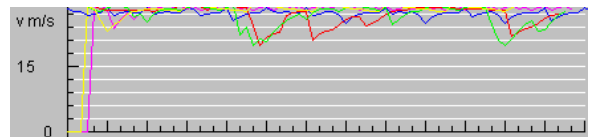


図-3 自由合流

表-1のケースAに示すのは、自由合流のシミュレーションの外部パラメータ値である。図-3は、シミュレーション結果を図示したものである。平均速度-時間の曲線より、最大平均速度が約30m/sになり、理論値33m/sを十分近似している。また、密度-時間の曲線と密度-平均速度の曲線より、密度は10台/kmくらいで、ほとんど変化していないことが読み取れた(ここでは図示していない)。この結果より、 Q_{tot} が1300台/hの以下の場合、自由合流になることが分かる。Aの交通量の組合せ3,4のケースにおいて、ランプから合流する交通量が増加する場合、一時的に速度が値下する減少がみられるが、それが渋滞の原因になることはなかった。

(2)強制合流

強制合流が生じるような状況では、localized clusters と呼ばれる局所的不安定状態と Homogeneous congested traffic と呼ばれる空間的に混雑が伝播する不安定状態が出現する⁸⁻¹⁰⁾。この確認のためのシミュレーションを行った。

(a) localized clusters 渋滞

表-1のケースBに示すのは、localized clusters 渋滞が発生する時の外部パラメータの値である。図-4に、合流部の上流側の観測地点のシミュレーション結果を示す。図の上半分が速度、下に密度を表示している。密度-平均速度曲線より、密度と速度の間には強い負の相関関係を確認することができる。最大密度は約102台/kmである。また、平

均値（約 15m/s）の周辺で変動を繰り返す不安定な状況が出現する。その結果、交通量と密度も平均値の周辺で変動する。合流部での局所的な不安定状況は上流部へは伝播せず、空間的に 1 部の箇所が時間的に不安定になる現象である。したがって、速度低下が観測されるが、密度の増加がない。

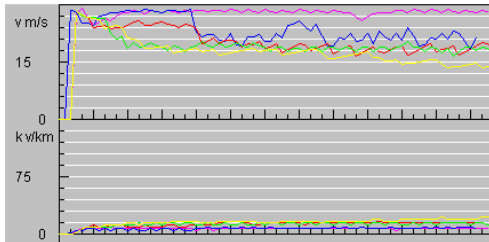


図-4 localized clusters 渋滞

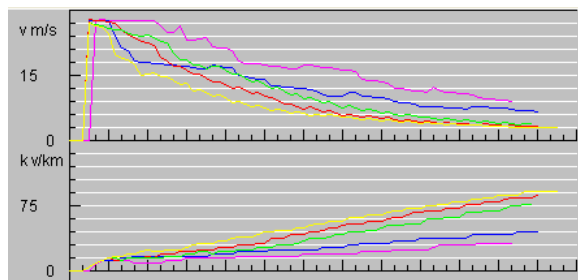


図-5 Homogeneous congested traffic 渋滞

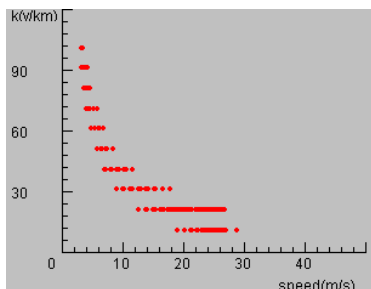


図-6 密度と速度の曲線

(b) Homogeneous congested traffic 渋滞

表-1のケースCの値は、不安定流れが発生する時の外部のパラメータの値である。図-5と図-6は、シミュレーションの結果である。交通量が増加に伴い、渋滞の波及構造はさらに明瞭になる。交通量 - 時間の曲線より、合流部の近い点では交通渋滞は空間軸に伝播し、その結果合流部に近い順に交通量が減少していく状況が観測された。

密度 - 時間の曲線より、時間を経るに従い、密度は増えていくことが分かった。すなわち、交通渋滞は時間軸に沿って伝播する。

平均速度 - 時間の曲線より、平均速度が最小

速度 3 m/s まで低下することが分かった。これらの結果から、ケース B では速度低下の伝播だけだったが、ケース C では交通量、速度、密度の 3 要素について空間的に伝播する現象が生じることが分かる。これは、Homogeneous congested traffic と呼ばれる。

6. まとめ

本論文は Helbing に提案された IDM と本研究で提案された車線変更モデルを組み合わせたシミュレーションモデルを用い、より現実的な交通状況が再現できるような交通シミュレーションシステムを提案した。これにおいて、localized clusters と Homogeneous congested traffic の違いが表現できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 交通工学研究会: やさしい交通シミュレーション、交通工学研究会、2000
- 2) 交通工学研究会: 交通シミュレーション適用のススメ、交通工学研究会、2004
- 3) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析 追従挙動モデルの整理と今後の展望、土木学会論文集, NO. 660/I V -49, pp.39-51, 2000
- 4) Pipes, L.A.: An Operational Analysis of Traffic of Traffic Dynamics, Journal of Applied Physics, Vol. 24, No.3, pp.274-287, 1953.
- 5) Chandler, R.E et.: Studies in Car Following, Oper. Res., Vol.6, pp.165-184, 1958
- 6) Newell, G.F.: Nonlinear Effects In the Dynamic of Car Follow, Oper. Res., Vol.9, pp.209-229, 1961
- 7) Prigogine, Herman: Kinetic theory of Vehicular Traffic, American Elsevier Publishing Company, 1971
- 8) D. Helbing: Micro- and macro-simulation of freeway traffic, Mathematical and Computer Modelling, vol.35, pp.517-547, 2002
- 9) D. Helbing: Derivation, properties and simulation of a gas-kinetic-based nonlocal traffic model, Physical Review E, vol.59, no.1, pp.239-253, 1999
- 10) D. Helbing: High-fidelity macroscopic traffic equations, Physical Review vol.219, pp. 391-407, 1995.
- 11) Peter Hidas Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving, Transportation Research Part C 13, pp.63-74, 2005
- 12) Qiyan, Haris N. Koutsopoulos: A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems, Transportation Research C, NO.3/ vol. 3, pp.113-129, 1996