

多台参照追従モデルによる交通渋滞緩和に関する研究

清水光輝

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の目的	1
1.2 本論文の構成	4
第 2 章 研究背景	5
2.1 はじめに	5
2.2 マクロモデルとミクロモデル	5
2.3 マクロモデル	6
2.3.1 流体モデル	6
2.3.2 LWR モデル	7
2.4 ミクロモデル	7
2.4.1 セルオートマトンモデル	8
2.4.2 車両追従モデル	11
2.4.3 1 台参照追従モデル	11
2.4.4 多台参照追従モデル	13
第 3 章 セル・オートマトンモデルによる料金所の交通流シミュレーション	15
3.1 はじめに	15
3.2 セル・オートマトンモデル	15
3.2.1 セル・オートマトンと確率速度法	15
3.2.2 解析領域	16
3.2.3 状態量	18
3.2.4 ローカル・ルール	18
3.2.5 車両の配置と端点条件	27
3.3 解析例	28
3.3.1 一車線道路	28

3.3.2	二車線道路	33
3.3.3	まとめ	37
第 4 章	多台参照追従モデルによる隊列走行シミュレーション	41
4.1	はじめに	41
4.2	車両追従モデルの安定性解析	41
4.2.1	車両追従モデル	41
4.2.2	安定性解析	42
4.2.3	考察	48
4.3	数値解析例	48
4.4	まとめ	52
第 5 章	ETC ゲートに進入する隊列走行車両の交通シミュレーション	53
5.1	はじめに	53
5.2	車両追従モデルの安定性解析	53
5.2.1	車両追従モデル	53
5.2.2	参照車両群に対する反応度	54
5.2.3	参照車両群に対する感応度	58
5.3	数値解析例	59
5.3.1	解析対象	59
5.3.2	シミュレーション結果	61
5.4	まとめ	63
第 6 章	結論	71
	参考文献	77

図 目 次

2.1	ルール 184-CA モデル基本図	8
2.2	東名高速道路の実測値における基本図 [18]	10
3.1	直進道路	16
3.2	ローカル・ルール	19
3.3	直線道路での行動ローカル・ルール	21
3.4	料金所手前での行動ローカル・ルール	22
3.5	直進ローカル・ルール	23
3.6	車線変更ローカル・ルール	24
3.7	相対加減速ローカル・ルール	26
3.8	絶対減速ローカル・ルール	27
3.9	移動ローカル・ルール	28
3.10	解析領域	28
3.11	通常料金所または ETC 料金所を設置した場合と高速道路の交通量	30
3.12	通常料金所または ETC 料金所を設置した場合と高速道路の平均速度	30
3.13	両用料金所を設置した場合と高速道路の交通量	32
3.14	一車線道路の交通量	32
3.15	解析領域	33
3.16	通常料金所または ETC 料金所を 2 箇所を設置した場合と高速道路の交通量	34
3.17	両用料金所を 2 箇所を設置した場合の交通量	34
3.18	通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合の交通量	35
3.19	通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合と一車線の通常料金所の交通量	38
3.20	通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合と一車線の ETC 料金所の交通量	38
3.21	通常料金所と両用料金所を 1 箇所ずつ設置した場合の交通量	39

4.1	隊列走行	42
4.2	特性曲線 ($m = 1$)	45
4.3	特性曲線 ($m = 2$)	45
4.4	特性曲線 ($m = 3$)	47
4.5	特性曲線 ($m = 4$)	47
4.6	交通シミュレーションの結果 ($m = 1$)	49
4.7	交通シミュレーションの結果 ($m = 2$)	49
4.8	交通シミュレーションの結果 ($m = 3$)	50
4.9	シミュレーションの結果 ($m = 4$)	50
4.10	最後尾車両の速度	51
5.1	隊列走行	54
5.2	第 1 追従車両	54
5.3	第 2 追従車両	55
5.4	第 2 追従車両から参照車両群に対する反応度	55
5.5	第 3 追従車両	57
5.6	第 3 追従車両から参照車両群に対する反応度	57
5.7	第 4 追従車両	58
5.8	モデル 1 に従う 5 台隊列走行の速度変位図	60
5.9	モデル 2 に従う 5 台隊列走行の速度変位図	60
5.10	モデル 3 に従う 5 台隊列走行の速度変位図	61
5.11	モデル 1 に従う 10 台隊列走行の速度変位図	62
5.12	モデル 2 に従う 10 台隊列走行の速度変位図	62
5.13	モデル 3 に従う 10 台隊列走行の速度変位図	63
5.14	モデル 1 に従う 15 台隊列走行の速度変位図	64
5.15	モデル 2 に従う 15 台隊列走行の速度変位図	64
5.16	モデル 3 に従う 15 台隊列走行の速度変位図	65
5.17	車群が ETC ゲートを通過するにかかる時間の比較	65
5.18	モデル 1 の時空図	66
5.19	モデル 2 の時空図	67
5.20	モデル 3 の時空図	68

表 目 次

3.1	道路の状態量	17
3.2	解析パラメータ	29
4.1	シミュレーションにおける感応度の設定	48
5.1	参照車両群に対する反応度	59

第1章 緒論

1.1 研究の目的

世界各国における自動車保有数は一貫して増加しており、特に発展途上国でその増加が激しい。発展途上国では道路網整備の遅れていて歩行者・自転車・二輪車・自動車などの混在交通を行うために交通量が低下する非効率な道路が存在する。その上効率的な交通制御がなされていないため、交通渋滞が頻繁に起こっている。それによる経済的損失、大気汚染、騒音等による環境悪化は大きな社会問題となっている。日本においては、自動車保有台数はここ数十年で急増して平成 23 年に 7 千 8 百万台を超えている。都市部において引き起こされた交通渋滞は、輸送時間、輸送コストの増加の原因となっており、その損失額は東京都で年間約 1.2 兆円、首都圏で年間約 2.8 兆円、全国で年間約 12 兆円と見積もられている。自動車台数増加のために自動車の排気ガスによる大気汚染は悪化している。自動車の排気ガスには、窒素酸化物、硫黄酸化物、浮遊粒子状物質、一酸化炭素などが含まれるため、ぜんそくなどの呼吸器の疾患を引き起こし、アレルギー疾患との関連も指摘されている。特に、窒素酸化物の主な発生源は自動車の排気ガスであって、その 48 % は自動車によるとされている。これらのことから、自動車には厳しい環境基準が定められているが、十分な効果を上げているとは言えない [33, 40, 53] 。

そこで、経済損失や環境問題を改善するために交通渋滞を緩和するような交通流シミュレーションと交通制御に関する研究が行われている。

交通シミュレーションのモデルは、マクロモデルとミクロモデルの 2 つに大別され、それぞれに利点と欠点がある [40, 42] 。マクロモデルは、車の流れを流体として扱い、個々の車両の特性の違いは無視して、マクロ的な視点から交通流を捉えようとする。個々の車両挙動の影響が少ない広域の道路ネットワークにおける交通現象等を扱うのに用いられる。マクロモデルとしては、1955 年に Lighthill と Whitham によって提案されているモデルや、Richards によって提案されたモデルが最初のもと考えられている。このモデルは、現在でも渋滞時の交通流の挙動の解析などに応用されている。ミクロモデルでは、個々の車両挙動をモデル化し、それらの相互作用として交通流を表現する。個々の車両の挙動をモデル

化するので、車両の特性や運転者の特徴などを表現することが可能で、個々の車両特性が交通渋滞などに与える影響を評価するのに適している。都市部や高速道路などにおける交通渋滞においては、個々の車両特性の違いが大きな影響を与えているとの指摘があり、ミクロモデルに基づく交通シミュレーションを行う必要がある [50]。

ミクロモデルに基づく交通シミュレーションにおいては、個々の車両の特性や挙動の違いをモデル化する必要がある。そのために、力学モデルに基づく車両追従モデル、セル・オートマトンモデル、ファジィモデル等様々なモデルが提案されている [32, 38, 47]。

車両追従モデルの研究は 1950 年代から行われている。車両追従モデルでは、前方車両の位置や速度などの情報を得て、それと自車両の情報に応じて、自車両の速度や加速度を制御する。Chandler モデルでは、直前方車両との速度差によって自車両の加速度を更新する [6]。Bierley モデルでは、直前方車両との速度差と車間距離によって自車両の速度を更新する [5]。Bexelius モデルは Chandler モデルを拡張したモデルであり、前方車両 2 台との速度差によって自車両の加速度を更新する [4]。また、Newell モデル [17] や最適速度モデル [2, 3, 10, 43, 44] では速度や加速度を車間距離の関数として与える。最適速度モデルは日本において提案されたモデルであり、実際の交通データとの比較も詳細に行われて、高速道路における交通渋滞を表現できることが示されている。

一方、離散的計算モデルであるセル・オートマトン (CA) モデルでは、解析対象領域を格子セルに、時間を離散時間に分割する。各タイムステップごとに、セルの状態を、注目セルとその近傍セルの内部状態に基づきローカル・ルールを適用して更新する [34, 42]。このモデルを交通流に適用する場合には、解析対象を道路として、セルの状態量を車両および道路状態とし、ローカル・ルールを車両の加減速、車線変更などの行動規則に対応させる。セル・オートマトンモデルを交通流シミュレーションに適用した研究の最も初期のものは、ウルフラムによって提案されたルール 184CA モデルとされている。このモデルでは、1 車線道路において加減速なしに、衝突することなく走行する車両の交通をモデル化している。しかし、このモデルでは、実際の交通における交通渋滞を適切に表現できないことが明らかとなっている。そこで、速度変化を加えた Nagel-Schreckenberg モデル等の研究が行われている。また、車両追従モデルとセル・オートマトンモデルの理論的な関連を明らかにした研究も示されている [46]。

マクロモデル、ミクロモデルともにそれぞれ利点があり、その利点を活かしてさまざまな交通流シミュレータが開発・利用されている [1, 15, 26, 31, 35, 49–52]。市販されているシミュレータとして代表的なものとしては、マクロモデルとミクロモデルを組み合わせた

ハイブリッド密度法による AVENUE [31] , グラフ理論と車両数台をひとつにまとめて扱う SOUND [37] , グラフ理論とマイクロモデルを組み合わせた NETSTREAM [50–52] などが有名である .

交通シミュレータを含む情報通信技術を交通制御に適用する研究は、高度道路交通システム (ITS) と呼ばれている . 高度道路交通システム (ITS) は、情報通信技術を利用して効率的で安全な交通を実現するための技術の総称である . 高度道路交通システムの広く実用化された成果の一つとして、道路通行量自動収受システム (ETC) がある . 信号などによる制御のない高速道路の交通においては、料金所における停車は交通渋滞の大きな原因の一つである . 道路通行量自動収受システムの設置により、料金所における交通渋滞は大幅に改善されている [54, 56, 57] . しかし、日本においては料金所を通過する速度は法律により 10km/h に制限されている . 停車する場合に比べれば大幅な改善ではあるが、通常の走行速度に比べて非常な低速に押さえられていることから、これが交通渋滞の原因となることは容易に想像される .

本研究では、自動車専用道路の道路通行料自動収受システムを通過する交通流を制御することを研究目的とする . このような交通状況を、道路を一定間隔で連なって走行する車両群が、ある一定の道路区間においてのみ強制的に速度が低下する状況としてモデル化してシミュレーションする . このような交通状況は、道路通行料自動収受システムを通過する交通流だけでなく、その他の渋滞を発生する様々な道路状況においてみられる . 例えば、高速道路において道路構造に起因する渋滞原因の一つとしてよく知られたものにサグ区間による渋滞がある . サグ区間では、運転者が気づかないほどわずかに道路の勾配が変化する所である . このような箇所では、運転者が勾配の変化に気づくのが遅れるため自動車が徐々に減速し、交通渋滞を発生し、場合によっては交通事故に至る .

本研究では、大きく 2 種類の研究を行う . 第 1 は、自動車専用道路の料金所および道路通行料自動収受システムを通過する交通流のセル・オートマトンモデルによるシミュレーションである . 道路通行量自動収受システム (ETC) の普及により料金所での交通渋滞は大幅に緩和されたが、それでも料金所における停車や減速は交通渋滞の大きな原因の一つである . そして、高速道路の料金所の形態は様々である . 走行車線の車線数が 2 車線で、料金所が 1 カ所の場合もあれば、交通量の多いところでは、料金所が 10 カ所ほど設置されている場合もある . 料金所の数が多いところでは、通常の料金所、道路通行料自動収受システムが設置された料金所、両方の機能を備えた料金所などが同時に設置されている . そこで、セル・オートマトンモデルを用いて料金所の種類と数を変えた場合の交通流について

シミュレーションを行う。

第 2 は、車両が一定間隔を置いて連続して料金所を通過するための効率的な車両の速度制御を行うモデルに関する研究である。車両の速度制御が車両追従モデルに従うと仮定し、安定性解析からモデルパラメータを定める。最初に、料金所を有しない、従って、車両が減速しない 1 車線道路において隊列走行するシミュレーションを行い、モデルの妥当性を検討する [8, 13, 19]。つづいて、料金所を有する、従って、車両が減速する 1 車線道路において効果的な前方車両の参照方法について検討する。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下のようになっている。

第 1 章では研究の目的、論文の構成について述べている。

第 2 章では、研究の背景について示す。交通シミュレーションのモデルをマクロモデルとミクロモデルに大別し、両者の特徴について述べてから、それぞれの代表的なモデルについて述べる。

第 3 章ではセル・オートマトンモデルによる道路通行料自動収受システムのゲート (ETC ゲート) のシミュレーションについて述べる。最初に、セル・オートマトンモデルのアルゴリズムについて紹介し、つづいてシミュレーション結果を示す。

第 4 章では、料金所を有しない 1 車線道路において隊列走行するシミュレーションを行う。車両の速度制御は、Chandler モデルまたは、それを多台参照追従モデルに拡張したモデルを用いる。安定性解析を行ってパラメータを決定し、片側 1 車線道路を隊列走行するシミュレーション結果を示す。

第 5 章では、料金所を有する 1 車線道路において隊列走行する車両群の制御について述べる。隊列において、各追従車両にとって適切な参照車両の取り方について検討してから、シミュレーションの結果を示す。

第 6 章はまとめであり、本研究で得られた知見についてまとめて示すとともに、今後の展望について述べる。

第2章 研究背景

2.1 はじめに

本章では、交通流の数値モデルと交通シミュレーションの方法において、本研究と関連する分野について紹介する。

2.2 マクロモデルとミクロモデル

交通シミュレーションに関する研究は 1950 年代から行われており、様々なモデルが提案されている。交通シミュレーションモデルはマクロモデルとミクロモデルの 2 つに大別され、それぞれに利点と欠点がある。

マクロモデルは車の流れを流体として表現する。交通流を車両個々の行動の相互作用の結果として扱うのではなく、時間当たりの断面通過車両台数、ある距離内に存在する車両台数といった統計的データで表現し、マクロ的な視点から交通流を捉えようとする。個々の車両挙動を考慮する必要が少なく、広域の道路ネットワークにおける交通現象を扱うのに向いている。また、ミクロモデルに比べて計算コストが低いのが特徴である。マクロモデルの最初のもは、1955 年に Lighthill と Whitham によって提案されている。これとは別に、同時期に Richards によっても 1 次元流体モデルが考え出されている。このモデルは、現在でも渋滞時の交通流の挙動の解析などに応用されている。

ミクロモデルでは、個々の車両挙動をモデル化し、それらの相互作用として交通流を表現する。個々の車両の挙動をモデル化するので、車両の特性や運転者の特徴などを表現することが可能で、個々の車両特性が交通渋滞などに与える影響を評価するのに適している。ミクロモデルでは、車両追従モデル、セル・オートマトンモデルなどがあり、計算コストは高いが、詳細なシミュレーションを行うことができる。

2.3 マクロモデル

ここでは、マクロモデルとして流体モデルと、それを改良した LWR モデルについて述べる。

2.3.1 流体モデル

流体モデルでは、車両を流体分子、交通の流れを流体流として扱う。

時間を t 、道路に沿った距離を x 、局所的な車両密度を $\rho(x, t)$ 、定常状態の局所的な流量を $q(x, t)$ とすると次の連続方程式を得る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

流量 $q(x, t)$ 、車両密度 $\rho(x, t)$ 、空間平均速度 $v(x, t)$ 間の関係式 $q = \rho v$ を用いると次式を得る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = v' \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = v' \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.4)$$

ここで $\partial v / \partial \rho \equiv v'$ である。式 (2.2) に式 (2.3) を代入すると次式を得る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (v + \rho v') \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

次に運動方程式の一般形として次式を考える。

$$\frac{dv}{dt} = -c^2 \rho^n \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.6)$$

ここで、 c と n は定数である。この式は、交通流の加速度は車両密度のべき乗と変化率によって決まることを示す。ところで $v = v(x, t)$ から

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.7)$$

式 (2.6) に式 (2.7) を代入して、式 (2.3) と式 (2.4) を適用すると次式となる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(v + \frac{c^2 \rho^n}{v'} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

式 (2.5) と式 (2.8) が自明でない解を持つためには，両式の括弧内が等しいことが必要であることから，次式を得る．

$$\begin{aligned}\rho v' &= \frac{c^2 \rho^n}{v'} \\ v' &= -c \rho^{\frac{n-1}{2}} \quad (\text{一般に } v' < 0)\end{aligned} \quad (2.9)$$

式 (2.9) が車両密度と空間平均速度との関係を示す微分方程式の一般形である．

2.3.2 LWR モデル

流体モデルを拡張したものとして，Lighthill，Whitham と Richards によって提案された LWR モデルがある．このモデルの支配方程式は，式 (2.1) を拡張した次式より導かれる．

$$n(x) \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.10)$$

ここで， $C(x, t)$ は交通密度， $n(x)$ はレーン数， $q(x, t)$ は交通量を表す．交通量は次式で与えられる．

$$q(x, t) = C(x, t) v(x, t) n(x) \quad (2.11)$$

LWR モデルでは，道路上の各断面において交通量は密度の関数として表され，臨界密度で交通量は最大値をとり，限界密度で交通量は 0 となる．このモデルでは，交通流の交通量 - 密度関係を定めることで交通流の状態変化を記述できるので汎用性が高く，実現象を的確に表現することができる．

LWR モデルでは個々の車両を同一として扱い，交通量 - 密度 - 速度の交通流指標の間にそれぞれ連続な関係があることを仮定している．しかし，実際の交通流の観測結果によれば，交通量 - 密度関係は臨界密度付近で不連続に変化することが示されている．LWR モデルは，そのような実現象を表現できない [48] ．

2.4 ミクロモデル

ここでは，本研究に關係するミクロモデルとして，セル・オートマトンモデルと車両追従モデルについて紹介する．

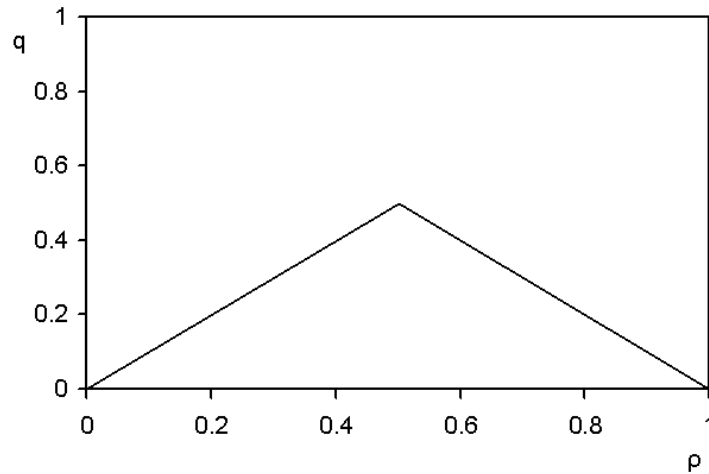


図 2.1: ルール 184-CA モデル基本図

2.4.1 セルオートマトンモデル

離散的計算モデルであるセル・オートマトン (CA) では，解析対象領域を格子セルに，時間を離散時間に分割する．各タイムステップごとに，セルの状態を，注目セルとその近傍セルの内部状態に基づきローカル・ルールを適用して更新する [34, 42]．このモデルを交通流に適用する場合には，解析対象を道路として，セルの状態量を車両および道路状態とし，ローカル・ルールを車両の加減速，車線変更などの行動規則に対応させる．

ルール 184-CA モデル

交通の CA シミュレーションモデルとして最初に提案されたのは，Wolfram により分類されたルール 184 と名付けられたローカル・ルールに基づくモデルである [30]．各セルは，状態として 0, 1 の 2 状態をとり，1 が車両が存在する状態，0 が車両が存在しない状態を示す．そして，このモデルにおけるローカル・ルールは，形式的に次式で与えられる．

$$\left\{ \frac{111}{1}, \frac{110}{0}, \frac{101}{1}, \frac{100}{1}, \frac{011}{1}, \frac{010}{0}, \frac{001}{0}, \frac{000}{0} \right\} \quad (2.12)$$

各項の上の数字は自セルとその両隣のセルの状態を表している．下の数字は自セルの次のタイムステップでの状態を表す．例えば，最も左側のルールは，遷移前の状態において，自セルと両隣セルの状態が全て 1 であって，次タイムステップでは自セルの状態が 1 である

ことを示している．各項の下に数字を並べた数字 10111000 を二進法から十進法に変換すると 184 となるためルール 184 と呼ばれている．

このルールでは，右のセルが空いている時には右に車両が進むという，最も簡単な交通流のモデルと解釈することができる．このような非常に単純化されたモデルであるが，交通流の最も基本となる性質を持っている．ルール 184-CA モデルにおける基本図を図 2.1 に示す．横軸と縦軸には，それぞれ車両密度 ρ と交通流量 q をとる．右上がりとなる $0 \leq \rho < 0.5$ の領域は渋滞が発生していない自由流領域を示し，右下がりとなる $0.5 < \rho \leq 1$ の領域は渋滞が発生している渋滞流領域を表す．したがって， $\rho = 1/2$ において自由流から渋滞流への相転移が起こっていることがわかる．

図 2.1 と実際の交通流の実測データを比較することを考える．実際の交通流のデータを図 2.2 に示す [18]．図 2.2 は 1996 年 1 月の東名高速道路の日本坂トンネル手前付近で上り方面の交通流のデータを示している．(A) が走行車線，(B) が追い越し車線のデータである．走行車線の図 (A) は，渋滞流相のバラつきを無視すると全体の傾向としてルール 184-CA モデルと似た三角形になっている．しかし，図 (B) の追い越し車線の基本図では，単純な三角形ではなく三角形の一边が飛び出した形になっている．つまり，右上がりの自由流相から右下がりの渋滞流相への移行はルール 184-CA モデルのように単純な三角形にならず，現実の交通では一部自由流の状態を残しながら渋滞流相へ相転移していくと考えられる．この状態は，渋滞が発生する臨界密度においても自由走行の流れは不安定ながら存在して，自由流相が長く伸びた状態となることを示している．これはメタ安定分岐現象と呼ばれており，高速交通流の追い越し車線では顕著に観測され，交通流の本質的な性質である [45]．

ルール 184-CA モデルは単純で，速度が常に一定な 1 次元道路のみを解析対象としているため，実際の交通流とはかけ離れていて，メタ安定分岐という高速交通流の本質的な性質を再現できない．

Nagel Schreckenberg (NaSch) モデル

ルール 184-CA モデルに車両の加減速のルールを加えたモデルが Nagel と Schreckenberg によって提案されている [16]．

このモデルでは，1 タイムステップあたりに車両が進むセル数 v によって速度を表す．最大速度 v_{\max} で走行可能な車両が速度 v ($v \leq v_{\max}$) で走行しているとき，速度 v および前方車両と車間距離 GAP に応じて以下のように加減速する．

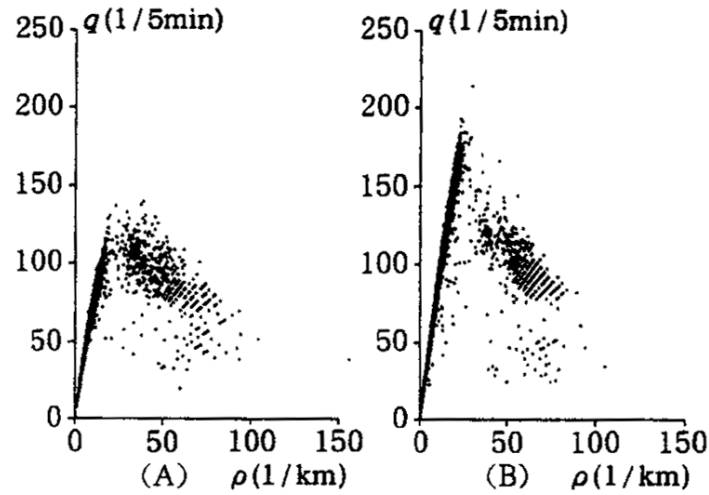


図 2.2: 東名高速道路の実測値における基本図 [18]

加速 $v < v_{\max}$ かつ $GAP \geq v + 1$ ならば $v \rightarrow v + 1$ に加速する .

減速 1) $GAP < v - 1$ ならば $v \rightarrow GAP$ として減速する .

減速 2) 確率 p で , $v \rightarrow v - 1$.

このモデルの基本図は実際の交通量とある程度一致しており、自由流から渋滞流への相転移は、実際の車両密度に近いところで発生する .

しかし、このモデルでは、1 タイムステップあたりの移動距離が複数セルになるので、市街地シミュレーションにおいては安全確認をする対象となるセルが多数となって、車両行動を定義するローカル・ルールを厳密に定義する必要がある . また、速度が離散的に大きく増減するため、市街地シミュレーションの細かい速度表現が難しい .

確率速度モデル

確率速度モデルは、一様乱数を用い速度表現するモデルである [23–25, 27, 36] . 車両速度 v は確率変数 P を用いて次式で与えられる .

$$v = v_{\max} \times P \quad (2.13)$$

ここで v_{\max} は車両の最大速度を示し、解析領域を分割したセルの大きさと 1 タイムステップの時間の大きさより一意に決まる .

自車両の前方セルが空白の場合，速度 $\bar{v} (< v_{\max})$ で走行する車両が移動するかどうかは，次のように決定される．

1. 式 (2.13) より導いた次式より P_0 を求める．

$$P_0 = \frac{\bar{v}}{v_{\max}} \quad (2.14)$$

2. $0 \sim 1$ の範囲で一様乱数 $P(x)$ を発生する．

3. $P(x) < P_0$ のときに，1 セル進む．

確率速度モデルでは 1 タイムステップで車両が移動するセル数が最大 1 セルとなっている．そして， $P_0 = 1$ のとき車両は毎タイムステップで 1 セル進むことになり，これが車両速度としては最大速度 v_{\max} となる．移動可能なセル数を最大 1 とすることで，ローカル・ルールを定義するために参照するセル範囲を他のモデルよりも狭くすることができ，車両の行動を定義するローカル・ルールを簡単化できる利点がある．

2.4.2 車両追従モデル

車両追従モデルでは，前方車両からの情報に応じて，自車両の挙動を制御する．最も単純な追従モデルは「速度（加速度）＝感応度×入力」と表すことができる．ここで，入力として車間距離，速度差，それぞれの組み合わせなどが用いられる．

ところで，入力を受ける車両としては直前方の車両だけを考慮するのが普通である．しかし，前方の複数台の車両を参照するモデルもいくつか提案されている．前者を 1 台参照追従モデルまたは単に追従モデル，後者を多台参照追従モデルと区別して呼ぶことにする．

2.4.3 1 台参照追従モデル

Chandler モデル

Chandler は前方車両との速度差に応じて自車両の加速度を制御するモデルを提案している．Chandler モデルの運動方程式は次式で与えられる．

$$\frac{dv_k(t+T)}{dt} = a\{v_{k-1}(t) - v_k(t)\} \quad (2.15)$$

ここで， v_k は k 番目の車両の速度である．したがって，右辺の $v_{k-1}(t) - v_k(t)$ は直前車両 $k-1$ と自車両 k の速度差を示す． a は感応度と呼ばれ，速度差に対する反応の強さを表す．

T は応答の遅れ時間を表し，人間が前方の車両からの情報に反応し判断した後，車両の制御を行うために要する時間を示している．

Newell モデル

Newell モデルでは，自車両の速度を直前方車両との車間距離の関数として定義し，制御するモデルを提案している [17]．このモデルの運動方程式は次式で与えられる．

$$\frac{dx_k(t+T)}{dt} = G(x_{k-1}(t) - x_k(t)) \quad (2.16)$$

ここで x_k は k 番目の車両の位置であり， G は車間距離の関数である． T は応答の遅れ時間を表す．

Bierley モデル

Bierley モデルでは，自車両の加速度は速度差と車間距離の両方の関数として定義される [5, 7, 9, 11]．このモデルの運動方程式は次式で与えられる．

$$\frac{dv_k(t+T)}{dt} = \alpha\{v_{k-1}(t) - v_k(t)\} + \beta\{x_{k+1}(t) - x_k(t)\} \quad (2.17)$$

ここで v_k は k 番目の車両の速度， x_k は k 番目の車両の位置， α は速度差に対する感応度， β は車間距離に対する感応度， T は応答の遅れ時間を表す．このモデルでは，相対速度と車間距離によって加速度を制御する．上式において，右辺第 2 項は車間距離が常に正となるために常に正の加速度として働く．よって前方車両との速度差がなく上式の右辺第 1 項が 0 となる場合，加速度は常に正となり，実際の車両挙動と異なる挙動を示す場合がある．

最適速度モデル

最適速度 (Optimal Velocity) モデルの特徴は最適速度関数を用いて速度制御することにある．最適速度関数は車間距離の関数として定義されており，運転者が理想的と考える速度を与える．そして，追従行動が実際の交通流に対する観測や実験結果を基にして非線形な関数でモデル化されている [22]．最適速度モデルでは，車両加速度が自車両の速度と最適速度関数の差に比例するようにモデル化されている．つまり，

$$\frac{d^2x_n(t)}{dt^2} = a\{V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt}\} \quad (2.18)$$

ここで, a は最適速度 V と現在速度 $dx_n(t)/dt$ とのずれに対する感応度である. Δx は直前の車両との車間距離を示す. 最適速度関数はシグモイド関数などを用いて, 次のように定義される.

$$V(\Delta x) = \tanh(\Delta x - c) + \tanh c \quad (2.19)$$

ここで, c は定数である.

このモデルは簡潔な微分方程式で記述されているために解析的取り扱いが容易で, 厳密解を求めることができる.

2.4.4 多台参照追従モデル

Bexelius モデル

Bexelius モデルは, Chandler モデルを拡張した多台参照追従モデルである. このモデルでは, 複数台の前方車両の速度と自車両との速度差に応じて自車両の加速度を制御する. この支配方程式を以下に示す.

$$\frac{d}{dt}v_k(t+T) = \sum_{j=1}^m a_j \{v_{k-j}(t) - v_k(t)\} \quad (2.20)$$

ここで, m は参照する台数, $a_j (j = 1, \dots, m)$ は j 台前方の車両に対する感応度, T は応答の遅れ時間を表す. このモデルでは, 隊列を形成した車群の安定性を数学的に解析できる. 参照する車両台数を増やすことでより現実に近い車両の挙動が表現できる [12].

Lenz モデル

Lenz モデルは, 最適速度モデルにおいて複数の前方車両を参照するように拡張したモデルである [14]. このモデルの支配方程式を以下に示す.

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = \sum_{i=1}^N a_i \left\{ V\left(\frac{\Delta x_{n-i}}{i}\right) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right\} \quad (2.21)$$

ここで, $V(\frac{\Delta x_{n-i}}{i})$ は最適速度関数, N は参照する台数, $a_i (i = 1, \dots, N)$ は i 台前方の車両に対する感応度を表し, Δx_{n-1} は 1 台前方の車両との車間距離を示す.

第3章 セル・オートマトンモデルによる料金 所の交通流シミュレーション

3.1 はじめに

本章では、セル・オートマトンモデルを用いて ETC ゲートを通過する交通流のシミュレーションについて述べる。このシミュレーションでは、片側 1 車線道路と 2 車線道路に ETC ゲートが設置された場合を扱う。2 車線道路を扱う場合では車両の車線変更を伴うので、セル・オートマトンモデルを用いる。また、本研究のセル・オートマトンモデルでは、速度表現に確率速度法を用いている。そこで、確率速度モデルについて紹介してから、車両行動や速度変更のためのローカル・ルールを定義し、シミュレーション結果を示す [20]。

3.2 セル・オートマトンモデル

3.2.1 セル・オートマトンと確率速度法

セル・オートマトンによるシミュレーションでは、解析時間を微小タイムステップに分割する。解析空間はセルと呼ばれる微小区間に分割し、そのセルそれぞれに離散的値である状態量を定義する。更に、ローカル・ルールという、近傍セルの状態量との相互作用を表現した式を定義する。そのルールに基づき、タイムステップごとに状態量を推移させて全体としての現象を表現する。

セル・オートマトンを交通流シミュレーションに適用する場合、道路を複数のセルで表現し、そのセルに車両が存在するかどうかを 2 進数で表現する。そして、車両の存在を更新するためにローカル・ルールを用いる。

交通流をシミュレーションする際に、速度概念を導入することは重要である。交通流において、各車両は加速・減速を頻繁に繰り返すが、それは近辺の車両の動きや路肩・信号などの相互作用によるものだからである。本研究では、車両の速度表現に確率速度法を用い

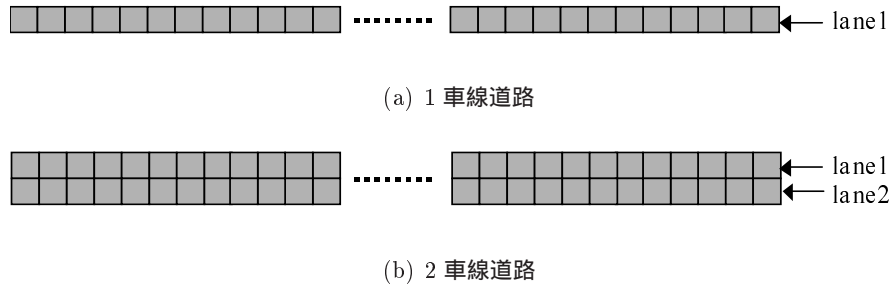


図 3.1: 直進道路

る．この方法では，車両速度 v は次の式で表される．

$$v = v_{def} \times P \quad (3.1)$$

ここで P は移動確率， v_{def} は解析領域でとりえる最大速度である． v_{def} の値は，セルの大きさや 1 タイムステップの時間の設定によって一意に決められる．この速度の時に，車両は 1 タイムステップに 1 セル移動することができる．

このモデルでは，車両の移動は以下のようにして表現される．

1. 次式より P_0 を求める．

$$P_0 = \frac{v}{v_{def}} \quad (3.2)$$

2. 0 ~ 1 の範囲で，一様実数乱数 $P(x)$ を発生させる．
3. $P(x) < P_0$ であるとき，そのタイムステップで車両を 1 セル進ませる．

3.2.2 解析領域

セル・オートマトン法によるシミュレーションでは，解析領域は正方格子で均一に分割される．直進道路のセル配置図を図 3.1 に示す．上から順に，1 車線道路，2 車線道路を表している．道路の向きは右向きで，車両は左端から進入して右端から流出する．また，道路の両側のセルは路肩に設定し，車両が進入できないようにする．1 セルの大きさは $3m \times 3m$ とし，車両は道路上の連続する 2 セルを用いて表現する．

表 3.1: 道路の状態量

百の位	十の位	一の位	説明
1	1	0	北方向直進車線
1	2	0	西方向直進車線
1	3	0	東方向直進車線
1	4	0	南方向直進車線
2	1	0	北方向左折車線
2	2	0	西方向左折車線
2	3	0	東方向左折車線
2	4	0	南方向左折車線
3	1	0	北方向右折車線
3	2	0	西方向右折車線
3	3	0	東方向右折車線
3	4	0	南方向右折車線
8	8	8	路肩及び障害物
*	*	4	通常車両後部
*	*	5	減速時車両後部
7	7	7	赤信号
5	*	*	通常料金所
6	*	*	ETC 専用料金所

3.2.3 状態量

セル・オートマトン法によるシミュレーションでは、配置されたセルに対して個々に状態量を定義する。本研究では、状態量は3桁の整数で表現される道路変数（道路種類・道路方向・道路状態）と車両番号を併せたものから成る。道路の状態量の一覧を表3.1に示す。表において、記号*はその位が取り得る数値のいずれであっても良いことを意味する。

道路変数において、百の位の数値は道路種類を示し、直進車線を1、左折車線を2、右折車線を3とする。十の位の数値は東西南北の方向を、一の位の数値は空間的に占められているかどうかを示している。また、路肩や障害物には上記とは異なる特別な3桁の数値を、料金所には百の位に固有の数値をそれぞれ与えている。なお、料金所を設定する場合は百の位が道路種類と重なってしまうが、本研究では高速道路の料金所をモデルにしている為、直進車線であるということが前提であるので、料金所の数値を道路種類としている。

セルに車両が存在する場合は、道路変数の前に車両番号がつけられる。車両は2セルで表現しているため、車両番号は車両の前部につけられ、車両の後部は道路変数の一の位を変えて表現する。その車両がブレーキを掛けて減速をしているならば5、そうでないなら4とする。

3.2.4 ローカル・ルール

セル・オートマトンによるシミュレーションで、セルごとの状態量を更新する規則を、ローカル・ルールという。本研究で用いるローカル・ルールには、直進・車線変更・停止などの行動を決定する「行動ローカル・ルール」、速度を制御する「速度ローカル・ルール」、車両の移動を決定する「移動ローカル・ルール」がある[23–25, 28]。ローカル・ルール全体の流れ図を、図3.2に示す。この流れは、車両の種類や道路の形状、車両位置などに関係なく、全車両に適用される。

安全車間距離

本研究では、車両は予め与えられた距離に前方車両との車間距離 G を保とうとすると仮定する。この車間距離のことを安全車間距離 G_s と呼び、これは実測データに基づく次式を用いて算出する[55]。

$$G_s = 0.0029 \times v^2 + 0.3049 \times v \quad (3.3)$$

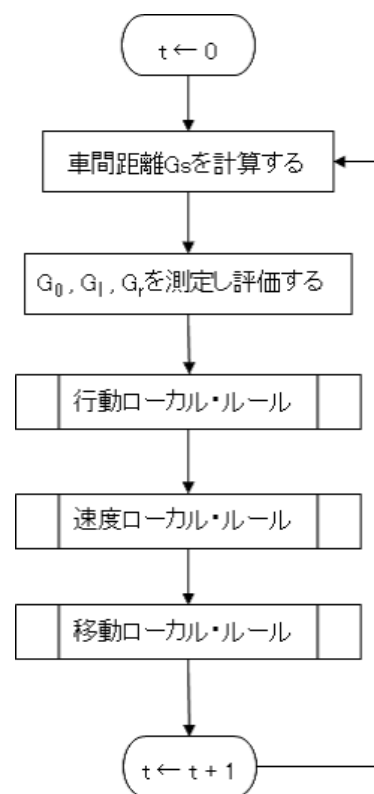


図 3.2: ローカル・ルール

前方車両との距離を G_0 , 右前方車両との距離を G_r , 左前方車両との距離を G_l とする . 車間距離 G_0, G_r, G_l は , 自車両の存在するセルと前方で最も近い位置にある車両が存在するセルの間の空白セルの数にセルの長さを乗じて算出する . 評価する時に参照するセルの範囲の最大値を G_{def} で表す . G_{def} 以内に車両が存在しない場合は , 車間距離は G_{def} とする . また , 自セルの左右が道路でない場合は , その側の車間距離は 0 とする .

行動ローカル・ルール

行動ローカル・ルールは , 車両行動の優先順位と各車両行動の可否を決定する規則である . 車両行動には , 直進・左折・右折・右車線変更・左車線変更・停止の 6 種類があるが , 本論文では , 自動車専用道路に料金所が設置された状態をシミュレーションしているので , 右左折のルールは利用しない . そして , 車両が料金所手前 370m 以内を走行している場合か , それ以外の場合かによって場合分けをする . これは , 車両が ETC 機器を積載しているかどうかで通過できる料金所が変わり , その車両に適した料金所を通るように車線変更するためである . ここで , 370m という数値は , [41] の料金所モデルを元に設定している .

直線道路における行動ローカル・ルール

直線道路における行動ローカル・ルールのフローチャートを図 3.3 に示す . このルールは , 車両が料金所から 370m 以上手前を走行している場合と料金所を通り抜けた後の場合に適用される .

最高速度 v_{max} の際の安全車間距離を G_{max} とする . 走行している車線の車間距離 G_0 が G_{max} より小さく , 右車線の車間距離 G_r が最も大きいならば右車線変更ローカル・ルール , 直進ローカル・ルールに進み , どちらもできない場合は停止する . 同様に , G_0 が G_{max} より小さく , 左車線の車間距離 G_l が最も大きいならば左車線変更ローカル・ルール , 直進ローカル・ルールに進み , どちらもできない場合は停止する . G_0 が G_{max} より大きい , G_0 が最も大きいならば , 直進ローカル・ルールを行い , 直進できない場合は停止する .

料金所手前における行動ローカル・ルール

車両が料金所手前を走行し , 料金所までの距離 G_g が $G_g < 370m$ 以内での直進車両の行動ローカル・ルールのフローチャートを図 3.4 に示す . 料金所までの距離が 370m となったときに , その料金所の種類を確認する . 注目車両が ETC 車両で正面に ETC 料金所がある

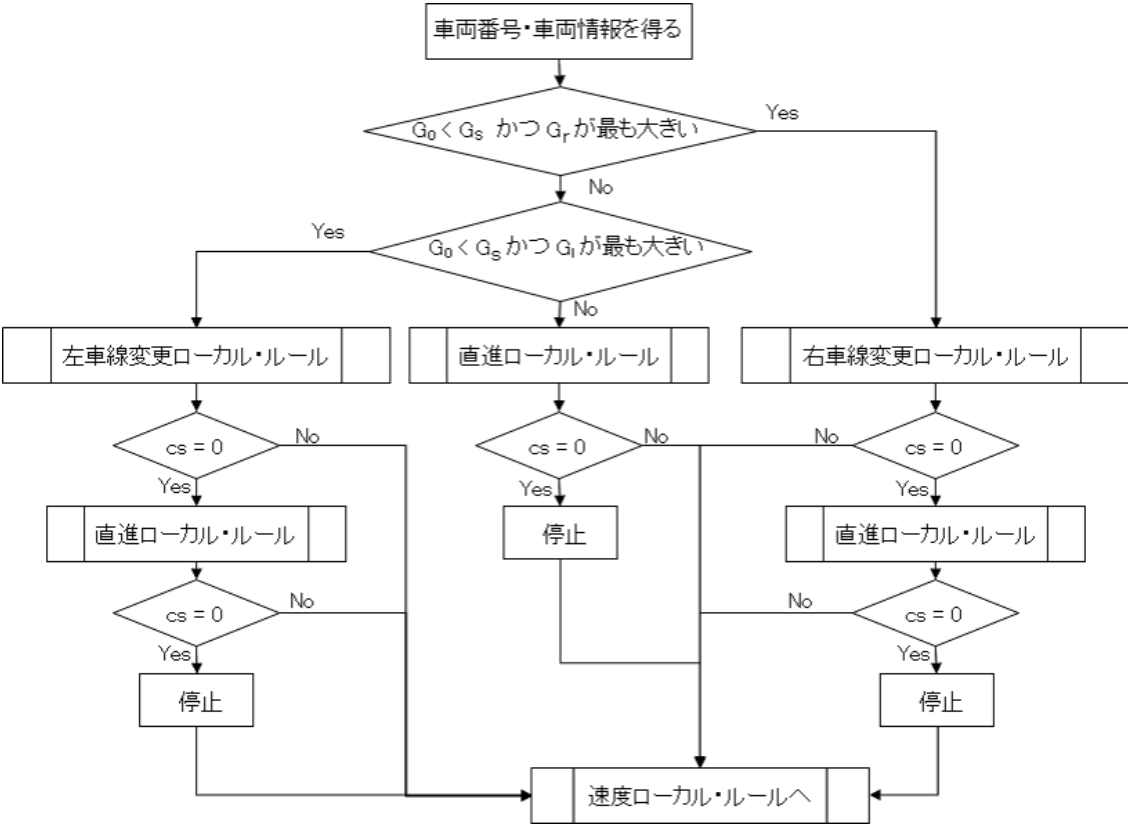


図 3.3: 直線道路での行動ローカル・ルール

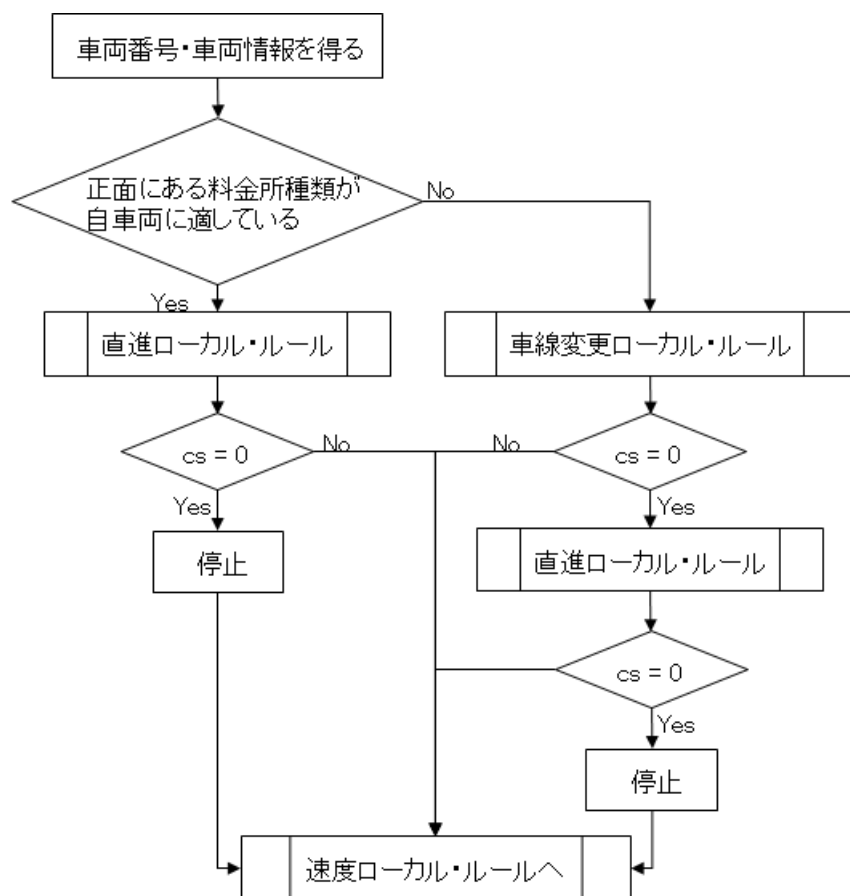


図 3.4: 料金所手前での行動ローカル・ルール

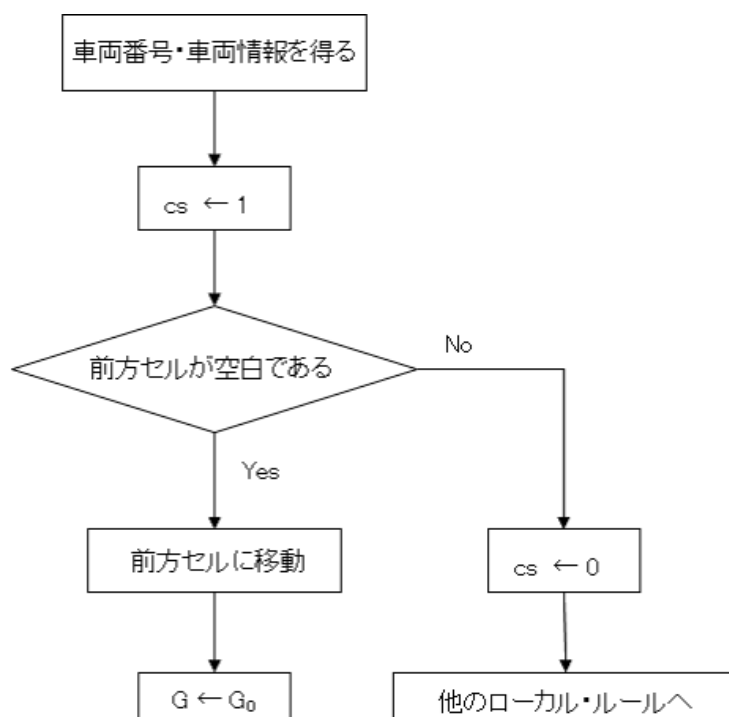


図 3.5: 直進ローカル・ルール

場合，または注目車両が一般車両で正面に通常料金所がある場合は，料金所を通過するまでは直進ローカル・ルールに進み，できない場合は停止する．注目車両が正面の料金所を通過できない場合は，他の車線について料金所を調べる．右側に通過できる料金所がある場合は，右車線変更ローカル・ルール，直進ローカル・ルールの順に進み，できない場合は停止する，を繰り返す．左側に料金所がある場合も同様に行われる．車線変更が行われた場合，次のタイムステップからは，直進ローカル・ルールに進みできない場合は停止する．

直進ローカル・ルール

直進ローカル・ルールのフローチャートを図 3.5 に示す．はじめに，注目セルに存在する車両番号と車両情報を得る．直進ローカル・ルールにおいて，移動予定セルは 1 セル前方のセルである．移動予定セルが空セルならば直進し，空セルでなければ停止する．直進する場合，車間距離 $G \leftarrow G_0$ とする．

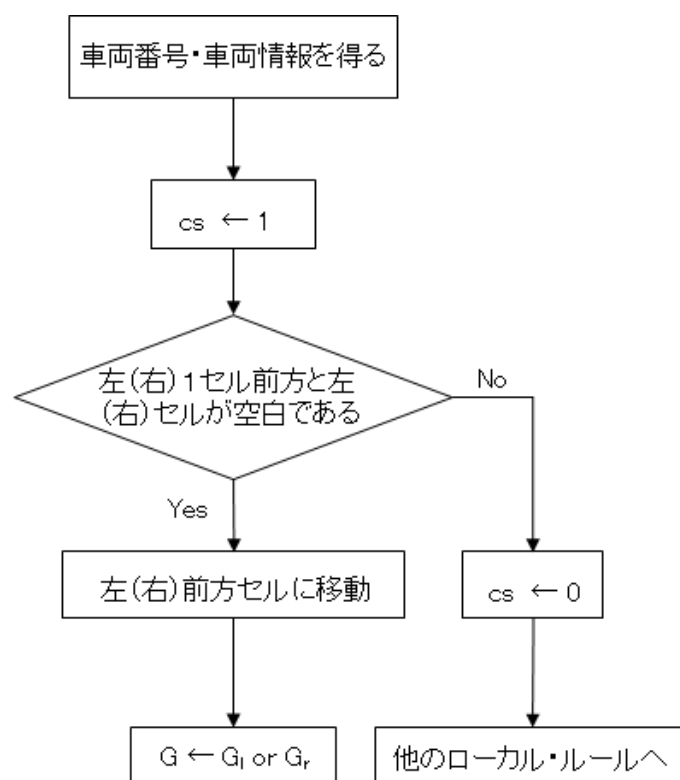


図 3.6: 車線変更ローカル・ルール

車線変更ローカル・ルール

車線変更ローカル・ルールのフローチャートを図 3.6 に示す．左車線変更と右車線変更は，左右対称になるだけで同様のローカル・ルールである．始めに，注目セルに存在する車両番号と車両情報を得る．右車線変更ローカル・ルールの移動予定セルは，1 セル前方 1 セル右方のセルであり，左車線変更ローカル・ルールの移動予定セルは，1 セル前方 1 セル左方のセルである．移動予定セルとその 1 セル後方のセルに車両が存在している場合は，車線変更はできないので他の行動ローカル・ルールへ進む．存在しない場合は，車線変更をする．右車線変更をする場合，車間距離 $G \leftarrow G_r$ とし，左車線変更をする場合， $G \leftarrow G_l$ とする．

料金所通過ローカル・ルール

料金所へ進入すると，一般車両は一度停止して料金を払い，ETC 車両は停止はせずに徐行して料金所区間を通過する．そのため，車両種類別に料金所を通過する場合のルールを定める．料金所へ進入するまでに，それぞれ速度ローカル・ルールにより減速してあるが，一般車両の場合は，それに加えて料金所で 12 秒間停止する．この数値は，ETC 料金所の 1 時間あたりの処理能力，約 230 台から逆算した数値に，車両の移動時間などを考慮した数値である [39]．停止したあとは，最高速度を 80km/h に戻し，再び加速していく．ETC 車両の場合は，料金所区間は最高速度を時速 20km/h に設定し，それ以下の速度で走行する．通過後は同様に，最高速度を 80km/h に戻して再び加速していく．

速度ローカル・ルール

速度ローカル・ルールは，全ての車両に一様に適用される．近傍にある車両との位置関係による相対的な加減速と，料金所との位置関係による絶対的な減速を行う．前者を相対加減速ローカル・ルール，後者を絶対加減速ローカル・ルールとする．

相対加減速ローカル・ルール 相対加減速ローカル・ルールのフローチャートを図 3.7 に示す．現在速度 v によって決まる安全車間距離 G_s と車間距離 G について， $G = G_s$ の場合は等速を保つが， $G > G_s$ の場合は加速度 α で加速し， $G < G_s$ の場合は加速度 β で減速する．加速後の速度 v が最高速度 v_{max} より大きくなった場合は， $v \leftarrow v_{max}$ として最高速度を超えないように修正する．同様に， $v < 0$ となった場合は， $v \leftarrow 0$ とし負の値にならないように修正する．なお， α と β の値は，実測値より定める [24, 55] ．

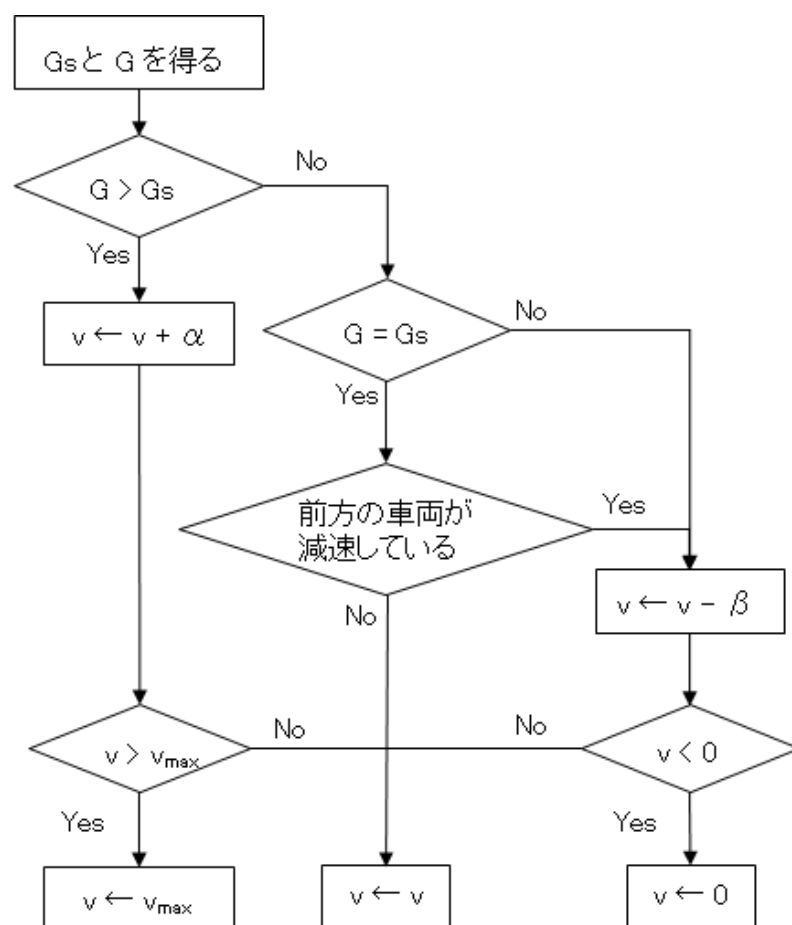


図 3.7: 相対加減速ローカル・ルール

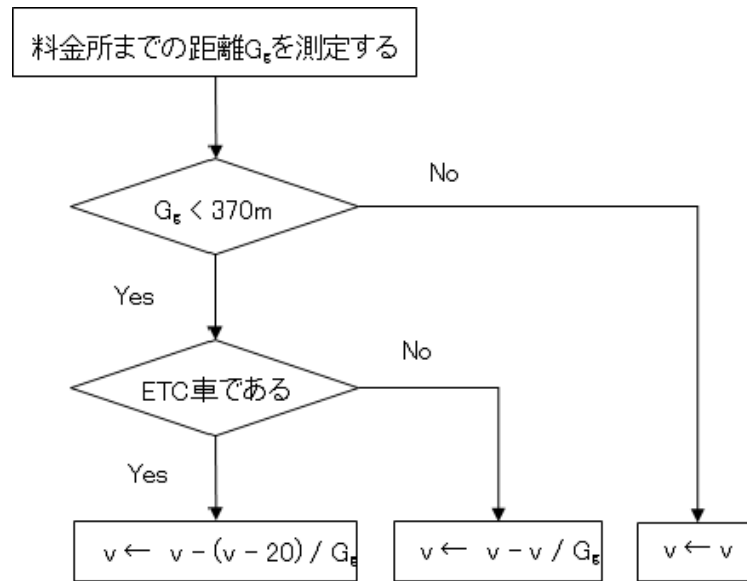


図 3.8: 絶対減速ローカル・ルール

絶対減速ローカル・ルール 絶対減速ローカル・ルールのフローチャートを図 3.8 に示す．本研究においては，料金所を通過する時に向けての減速を考える．料金所までの距離 G_g を評価する． $G_g < 370m$ のとき，料金所で ETC 車両の場合は時速 20km に，一般車両の場合は停止するように，それぞれ加速度 $\frac{v-20}{G_g}$ ， $\frac{v}{G_g}$ で減速する．なお，ETC 車両の時速 20km という数値は，国土交通省等により提言されている料金所を安全に通過できる速度である．

移動ローカル・ルール

移動ローカル・ルールは，確率速度モデルに従って車両が前方に進むかどうかを決定する．そのフローチャートを図 3.9 に示す．

車両が移動する確率を P_0 とし， $0 \sim 1$ の範囲で一様実数乱数 $P(x)$ を発生させる． $P(x)$ が P_0 より小さい時は 1 セル進み， $P(x)$ が P_0 より大きい時はその場で停止する．

3.2.5 車両の配置と端点条件

交通流セル・オートマトンにおいて，車両の発生には二つの方法が考えられる．シミュレーションの始めに解析対象領域にランダムに車両を配置する初期配置型と，流入車両密度を設定することにより，流入する車両を一定に保つ車両流入型である．

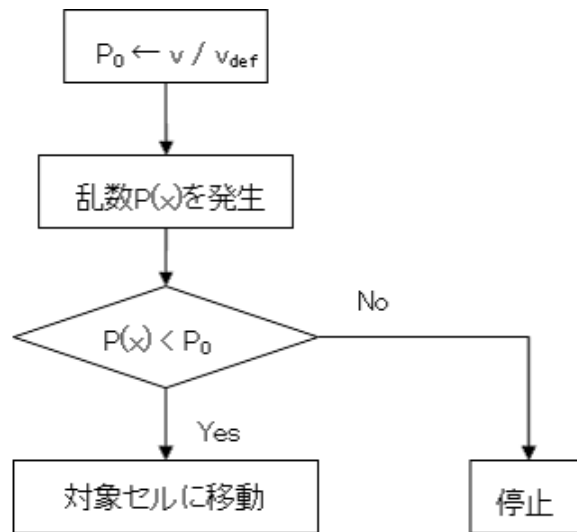


図 3.9: 移動ローカル・ルール

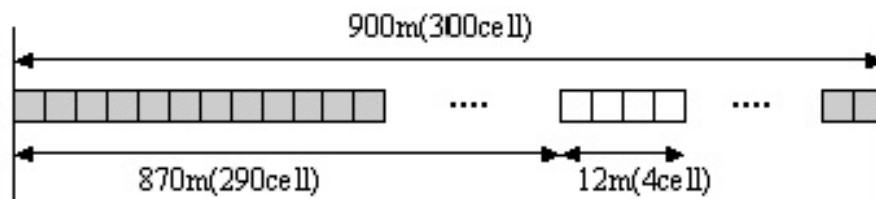


図 3.10: 解析領域

また，端点条件も，道路の端点まで達し次に出口から流出した車両が反対側の流入点から進入する周期境界条件と出口から流出したら車両は消滅する開放境界条件の二つの条件方法がある．

本論文では車両密度ごとの結果を測定し解析するので，車両密度を一定に保つことが容易である，初期配置型と周期境界条件を併せて用いることにする．

3.3 解析例

3.3.1 一車線道路

解析対象として，始めに片側一車線の高速道路を考える．

対象領域は，300 セル (900m) の直進道路とする (図 3.10)．車両の配置は初期配置型，端

表 3.2: 解析パラメータ

セルの大きさ	3(m)
1 タイムステップ	0.1(s)
車両配置	初期配置型
境界条件	周期境界条件
タイムステップ数	40000 (Timestep)
最高速度	80(km/h)
加速度 (加速時)	$0.6 < \alpha < 2.4 \text{ (m/s}^2\text{)}$
加速度 (減速時)	$1.2 < \beta < 3.0 \text{ (m/s}^2\text{)}$
安全車間距離	$0.0029v^2 + 0.3049v \text{ (m)}$

点条件は周期境界条件を用いる．また，道路の左端から 290 セル目から進行方向に 4 セル分を料金所と設定する．シミュレーションで用いるパラメータを表 3.2 に示す．タイムステップ数は全 40000 ステップ (4000 秒) であるが，最初の 4000 タイムステップは定常状態にするための期間として切り捨て，残りの 36000 ステップ (3600 秒) を評価することとする．料金所以外での最高速度は高速道路を考えているため 80km/h とし，ETC 料金所内は 20km/h とする．加速度は，文献 [55] にあるように，加速時には $0.6 < \alpha < 2.4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ ，減速時には $1.2 < \beta < 3.0 \text{ (m/s}^2\text{)}$ の範囲の値をとる．

次の 3 種類の料金所を考える．

- 通常車用の料金所（以下，通常料金所）
- ETC 車用の専用料金所（以下，ETC 料金所）
- 通常車と ETC 車の両用の料金所（以下，両用料金所）

以上の場合に料金所が無い高速道路部分を加え，交通量を比較する．なお，通常料金所の場合は一般車両のみ，ETC 料金所の場合は ETC 車両のみ，両用料金所の場合は両方の種類の車両を割合を変えて計測する．

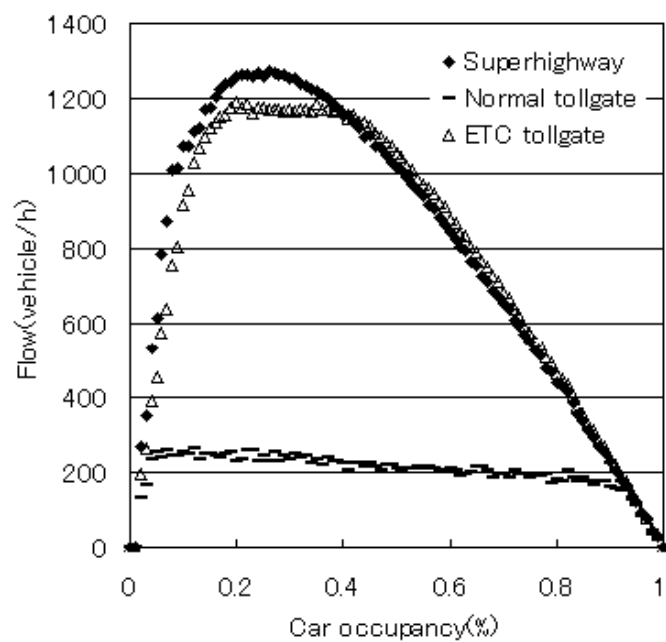


図 3.11: 通常料金所または ETC 料金所を設置した場合と高速道路の交通量

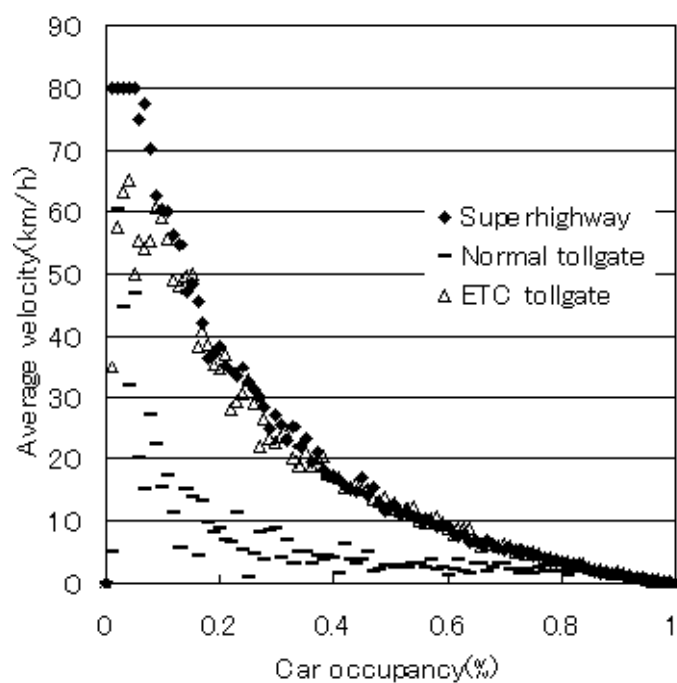


図 3.12: 通常料金所または ETC 料金所を設置した場合と高速道路の平均速度

通常料金所または ETC 料金所を設置した場合

通常の料金所または ETC 専用料金所を設置した場合の交通量を図 3.11 に示す．横軸に道路長さに対する車両の割合である車両密度（％），縦軸に 1 時間に通過する車両台数（交通量）をとる．また，この場合の平均速度の測定結果を図 3.12 に示す．横軸は車両密度（％），縦軸は車速である．両グラフとも，凡例は上から順に，高速道路部分，通常料金所を設置した場合，ETC 料金所を設置した場合を示している．

図 3.11 より，高速道路における交通量は，およそ 25％を頂点とした山形となっている．山形の頂点までは，最高速度を出してはいるが車両台数そのものが少ないため交通量は車両台数に比例して増え，頂点を越えると車両台数が多いため車両は速度を出すことができず渋滞し始め，交通量が徐々に減少していく様子がわかる．

ETC 料金所の場合は，高速道路の場合とほぼ形状が一致しているが，頂点の部分が平らに欠けた状態である．通常料金所の場合も同様に，高速道路の場合と形状が一致している部分があるが，頂点は更に欠けた状態になっている．これは，以下のように考えられる．まず，頂点に向かうまでの部分では，料金所へ向けた減速があるため，料金所が存在する場合高速道路よりも少ない交通量となる．しかし車両台数自体が少ないので，減速しても他車両へ与える影響は微小であり，交通量の差はそれほど大きくない．頂点付近の頭打ちになっている部分では，料金所の処理能力による交通量差が出ている．これは，料金所があると，その処理台数の限界から，最大交通量は料金所がない場合よりも少なくなるからである．また，図 3.12 より，最大交通量を超えた車両密度では平均速度もほぼ一致している．これは，料金所の有無に関わらず車両密度が高いために渋滞が発生していて，低速でしか移動できない状態であるためと考えられる．

両用料金所を設置した場合

両用料金所を設置した場合の解析結果を図 3.13 に示す．横軸に車両密度（％），縦軸に交通量（台/時）をとる．ETC 車両と一般車両の比を，1 対 9 から 9 対 1 まで 1 刻みに変更して測定している．グラフの凡例に示した数値は ETC：一般車両の値を示している．

3.3.1 と同様に，このグラフでも料金所のボトルネックの様子が再現されていることがわかる．また，ETC 車両の割合が多ければ多いほど，交通量が多くなっている．これは，ETC 車両と一般車両で料金所を通過する時間に大幅な差があるため，通過時間の少ない ETC 車両が多くなるにつれて料金所通過台数が増えるからである．更に，ETC 車両同士が連なって

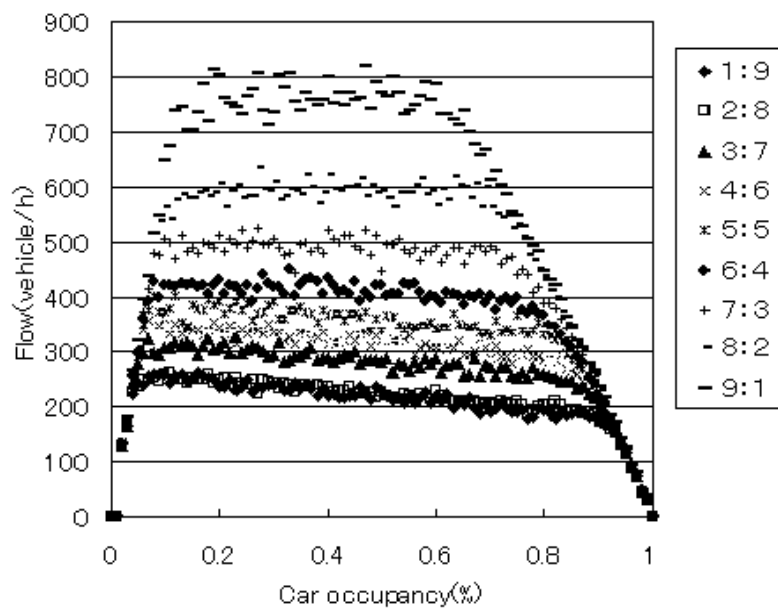


図 3.13: 両用料金所を設置した場合と高速道路の交通量

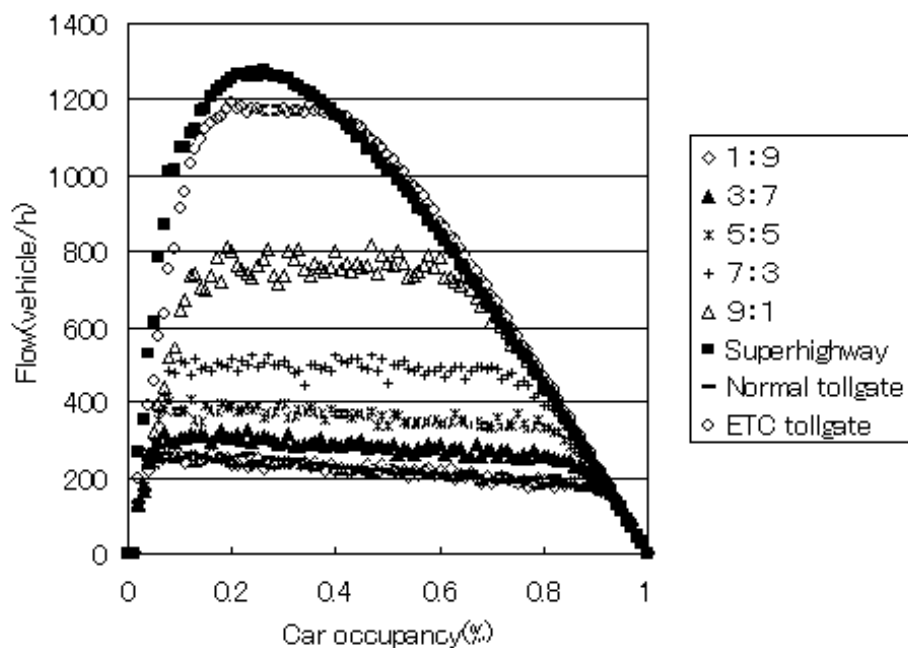


図 3.14: 一車線道路の交通量

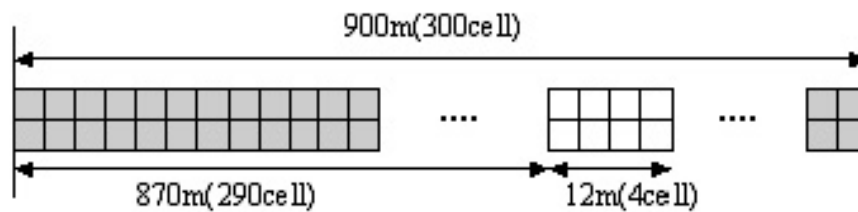


図 3.15: 解析領域

走行し料金所を通過するほうが減速が少なく済むため、交通量が増加する。そのため、ETC 車両の比率が高くなるに連れて、交通量の増分が大きくなっている。

ここで、図 3.14 を示す。これは、3.3.1 の結果に 3.3.1 の結果を重ね合わせたものである。なお、見やすくするため、図 3.14 は ETC 車両の割合が奇数の場合だけを表示している。この図を見ても、ETC 車両の比率によって交通量の増分が大きくなっている事がわかる。

3.3.2 二車線道路

次に、片側二車線の高速道路を考える。対象領域は、300 セル (900m) の直進道路を二本あわせたものとする (図 3.15)。他の解析条件は、3.3.1 節と同様である。

次の 5 種類の料金所の組み合わせを考慮する。

- 通常料金所が 2 箇所
- ETC 料金所が 2 箇所
- 両用料金所が 2 箇所
- 通常料金所が 1 箇所、ETC 料金所が 1 箇所
- 通常料金所が 1 箇所、両用料金所が 1 箇所

以上の設定に、料金所が無い高速道路部分も加え、交通量を計算し比較していく。

2 カ所に同種の料金所を設置した場合

2 つの料金所を同じとして、通常料金所、ETC 料金所を設置した場合、それに高速道路部分を加えた交通量の解析結果を図 3.16 に示す。同様に、両用料金所を設置した場合の交

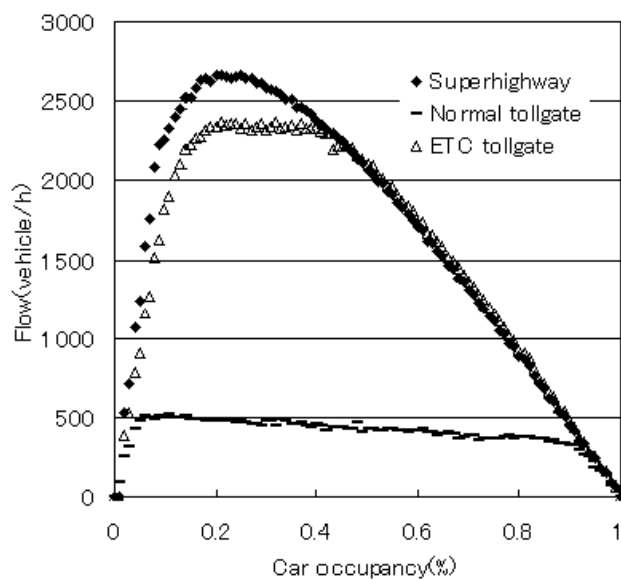


図 3.16: 通常料金所または ETC 料金所を 2 箇所を設置した場合と高速道路の交通量

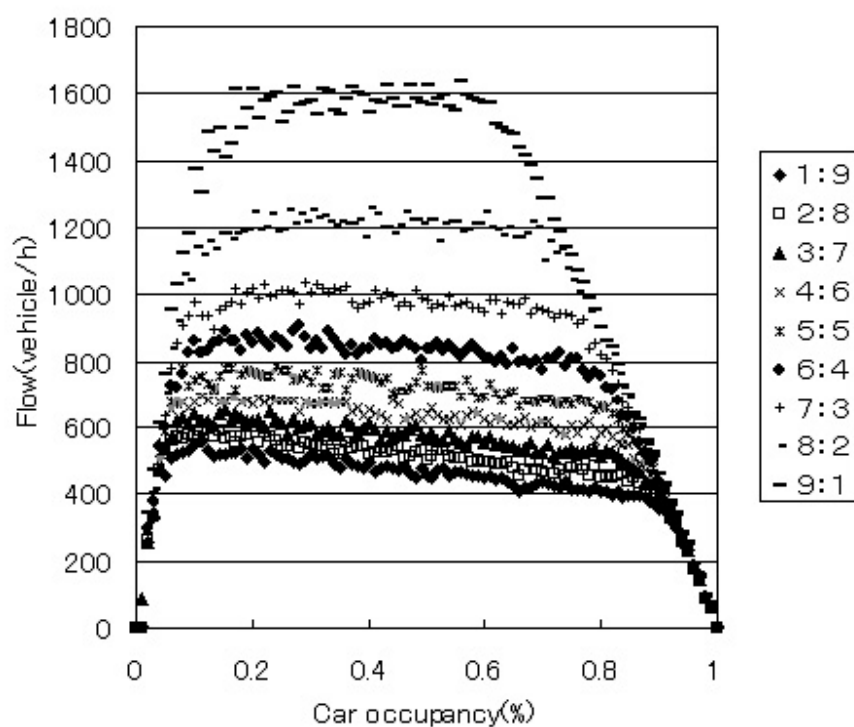


図 3.17: 両用料金所を 2 箇所を設置した場合の交通量

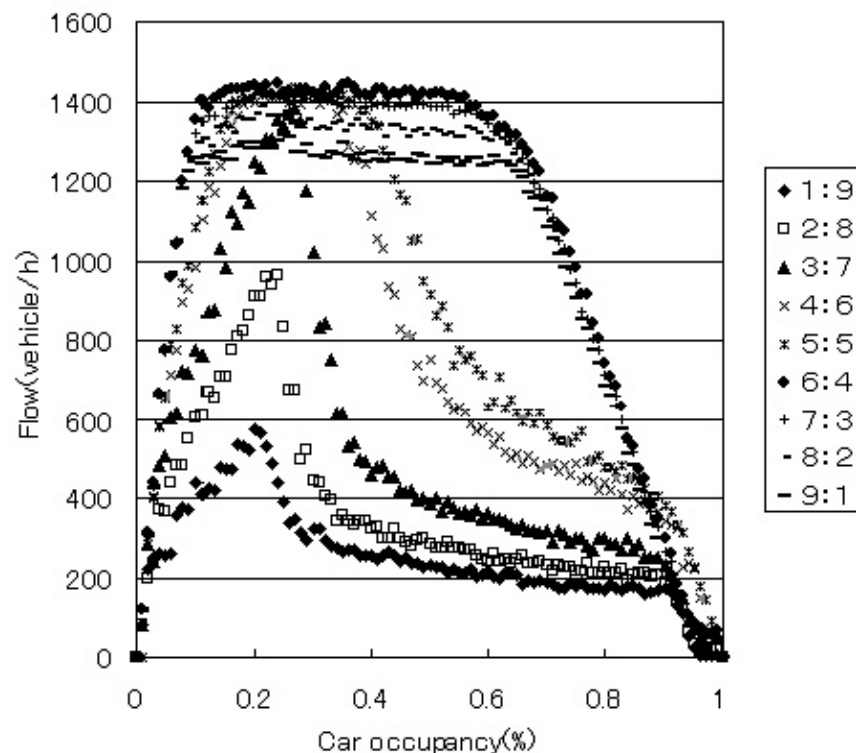


図 3.18: 通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合の交通量

交通量の解析結果を図 3.17 に示す。横軸は車両密度 (%), 縦軸は交通量 (台/時) を示し, 交通量は 2 車線分の値である。

この図 3.16 と図 3.17 は, それぞれ 1 車線での通常料金所または ETC 料金所を設置した場合と両用料金所を設置した場合における交通量の数値を二倍したものにほぼ一致している。これは, 2 車線に拡張したとはいえ, 同じ料金所が二つ並んでいるだけであるので, 通過料金所の選択やそのための車線変更が必要になる車両は存在しないからであると考えられる。この場合, 車線変更は正面の車間距離が狭くなりかつ他車線の車間距離のほうが広い時にのみ行われ, もし車線変更できない場合でも車両は直進を行う。よって, 左右の移動はあるものの直進的な移動は 1 車線の場合と変わらないためと考えられる。

通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合

通常料金所を 1 箇所, ETC 料金所を 1 箇所設置した場合の交通量の解析結果を図 3.18 に示す。横軸は車両密度 (%), 縦軸は交通量 (台/時) を示し, 交通量は 2 車線分の値である。

この図でも、やはり ETC 車両の割合が多いほうが比較的交通量も多いことがわかる。しかし、これまで述べてきた結果と比べると ETC 車両の割合が 50% 以下における車両密度ごとの交通量の変化と、ETC 車両の割合が 60% 以上における交通量の増減が異なっている。これらの現象は、以下のような理由によると考えられる。

ETC 車両の割合が 50% 以下の場合、車両密度が 0.2 ~ 0.4 の辺りで交通量は最大値を取っている。車両密度が小さい、即ち車両台数が少ないときは、ETC 車両と一般車両それぞれが各料金所へ向けて並んでも発生する渋滞は小さいため、交通量にはそれほど影響は無い。そのため、車両密度の増加につれて交通量も単純に増加している。その後、渋滞が発生すると交通量は急激に減少している。これは、車両がそれぞれ適した料金所へ進入するために車線変更を行わなければならないからと想像される。本論文で作成したプログラムは、料金所へ向けて車線変更をする区間を一定距離 (370m) に定めている。大部分の車両は、その区間内で車線変更を行うので問題ないが、その車線変更区間を越えて料金所からの渋滞が伸びてしまうと、後続車は車線変更を始める前に、もう片方の車線に侵入してしまう。そして間違った車線にいるまま直進し、料金所が近くなったときに正しい車線へ無理やり車線変更を行うことになる。しかし車線変更を行う先の車線は渋滞している状態であり、すぐには車線変更ができないので、車線変更ができるまでその車両は停止して待つことになる。するとその車両の後方の車両も停止することになり、その時の交通量は 1 車線分となる。これが何度も繰り返されるため、交通量の減少が著しくなるのだと考えられる。また、この現象が起こっているのは ETC 車両の割合が低い時である。この場合一般車両が多いため、一般車両が通過する通常料金所のある車線で渋滞が発生しており、一般車両が ETC 料金所がある車線へ進入してしまう状況になる。以上より、実際に測定される交通量は、一般車両が通常料金所を通過する交通量に、割合の低い ETC 車両が少量通過する程度の交通量となっていくと考えられる。1 車線の通常料金所の交通量のデータを重ねたグラフを図 3.19 に示す。

ETC 車両の割合が 60% 以上の場合、ETC 車両の割合が増加しても逆に交通量が減少している。これは、上述した最大値を越えた後の交通量の減少と同じ原因があると考えられる。この場合は、ETC 車両のほうが多いので ETC 車両が通過する ETC 料金所のある車線で渋滞が発生しており、ETC 車両が通常料金所がある車線まで進入している状況である。ETC 車両の割合が多いほど他車線へ進入する車両数が増え、その車両が車線変更をする間は他車線の交通量が 0 になる。従って、ETC 車両の割合が多いほうが全体として交通量が少なくなるのである。上述した場合と減少率が違うのは、車線変更する先の車線にい

る車両種類が ETC 車両であるためである。一般車両と違って料金所を通過する速度が速いので、その分車線変更をするために停止する時間も格段に短くなり、上述の場合と比べて、車線変更にともなう時間的ロスが少ないのである。実際に、一車線の ETC 料金所の交通量のデータを重ねたグラフを図 3.20 に示す。

通常料金所と両用料金所を 1 箇所ずつ設置した場合

通常料金所を 1 箇所と両用料金所を 1 箇所設置した場合の交通量の解析結果を図 3.21 に示す。横軸は車両密度 (%), 縦軸は交通量 (台/時) を示し、交通量は 2 車線分の値である。

この図でも、ETC 車両の割合が 50%以下か 60%以上かで交通量が異なっている。始めに、ETC 車両の割合が 50%以下の場合を考える。この場合は一般車両が多いが、一般車両にとっては料金所はどちらも通過することができるため、どちらの車線に入っても問題ない。また、ETC 車両にとっては混用の料金所を通るしかないが、ETC 車両台数は少ないため、一般車両はそれも含めて平均的に配置され走行する。よって、車線変更の影響を考慮する必要がないため、通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合にあるような急激な減少は見られない。しかし、ETC 車両の割合が 40%や 50%になると、一般車両の後方に ETC 車両が存在するという状況が多く見られるようになる。一般車両は料金所で停止するので、その間に ETC 車両は後方で列を作り一般車両が通過するのを待つことになる。そのため、交通量が減少するのだと考えられる。

次に、ETC 車両の割合が 50%以下の場合を考えるが、通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合とほぼ同様の値をとっている。これは、ETC 車両が多くなると両用料金所のある車線には ETC 車両が走行し、残りの通常料金所がある車線に一般車両が移動していくことになるので、結果として、通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合と同じ車線を走る状態になるからであると考えられる。

3.3.3 まとめ

本章では、確率速度法による速度表現と車両移動を用いたセル・オートマトンモデルを用いて料金所付近の高速道路のシミュレーションを行い、ETC 料金所と通常料金所、両用料金所による交通量の違いを考察した。

料金所の種類や ETC 車両の割合を変えてシミュレーションを行い、料金所の違いによる交通量の違いを考察した。解析対象として、3.3.1 節では一車線道路を、3.3.2 節では二車線

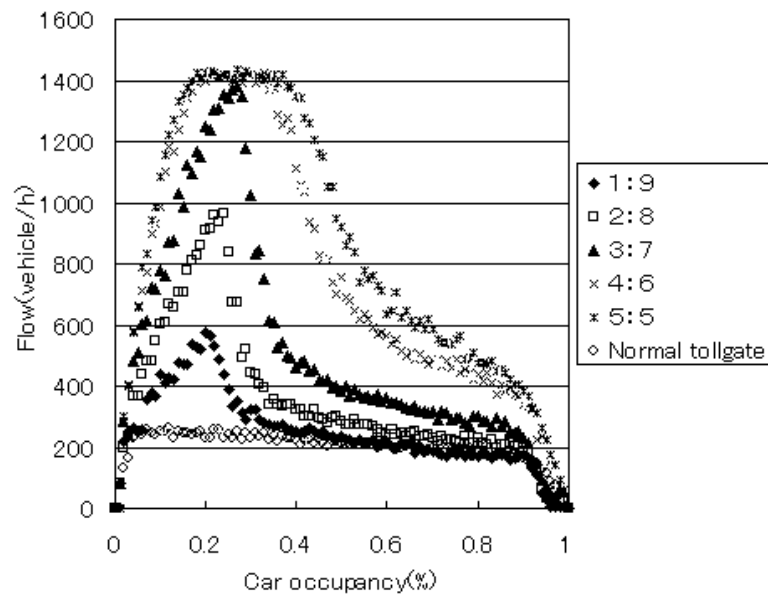


図 3.19: 通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合と一車線の通常料金所の交通量

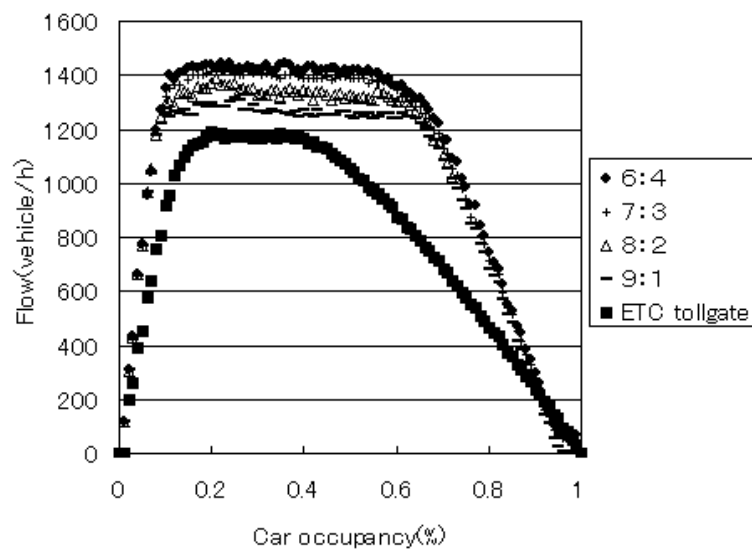


図 3.20: 通常料金所と ETC 料金所を 1 箇所ずつ設置した場合と一車線の ETC 料金所の交通量

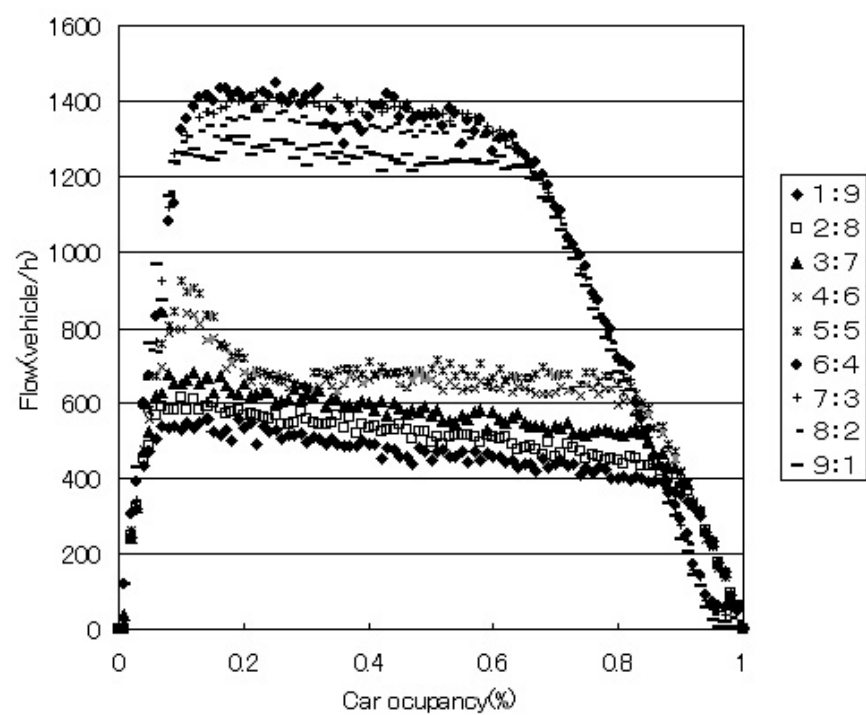


図 3.21: 通常料金所と両用料金所を 1 箇所ずつ設置した場合の交通量

道路を考えた．その結果，交通量は，ETC 車両の密度と料金所の種類に大きく依存すると分かった．ETC 車両の割合が低い場合は，ETC の料金所を設置すると，一般車両が充満して ETC 料金所のある道路にも入ってしまい，その結果，車線変更を余儀なくされ渋滞を引き起こしてしまう．ETC 料金所の代わりに両用料金所を 1 つ設けても，渋滞は解決できなかった．また，ETC 車両の割合が高い場合は，ETC 料金所でも両用料金所でもそれほど結果に差は無かったが，ETC 車両の割合が高いほど 2 つの車線に料金所の区別を設けると，交通量は逆に減少していく様子が見られた．以上より，交通量を高い状態で維持するためには，ETC 車両の割合や車両の密度に注目しながら料金所の種類を定める必要があるということがわかった．

第4章 多台参照追従モデルによる隊列走行シミュレーション

4.1 はじめに

前章で述べたように，セル・オートマトンモデルによって高速道路の ETC ゲートの交通流について解析した結果，ETC ゲートは通常の停車する料金所よりも交通容量をかなり大きくできることがわかった．しかし，速度低下を強いられることからある程度の交通容量の低下がみられることもわかった．

ETC ゲートを通過する交通のもっとも基本的な道路形態は，速度低下なしに列をなして ETC ゲートを通過する交通と考えられる．これは，複数の車両が連なって走行する隊列走行にほかならない (図 4.1)．そこで本章では，ETC ゲートの交通容量を改善するためのもっとも初歩の段階として，多台参照追従モデルを利用して効率的な隊列走行を実現することを考える [21, 58] ．

4.2 車両追従モデルの安定性解析

4.2.1 車両追従モデル

本研究で扱う車両ダイナミクスは次式で定義される．

$$\ddot{x}_n(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^m a_j (\dot{x}_{n-j}(t) - \dot{x}_n(t)) \quad (4.1)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

ここで， $x_n(t) > 0$ は n 番目の車両位置， $a_j > 0$ は j 台前方の車両に対するドライバーの感応度， $\Delta t > 0$ は遅れ時間， N は全車両数， m は参照車両台数である． $n - 1$ 番目車両は n 番目車両の直前車両となる．そして， $m = 1$ のときは Chandler ら [6] のモデル， $m > 1$ のときは Bexelius [4] や Wakita らが用いたモデル [29] となる．

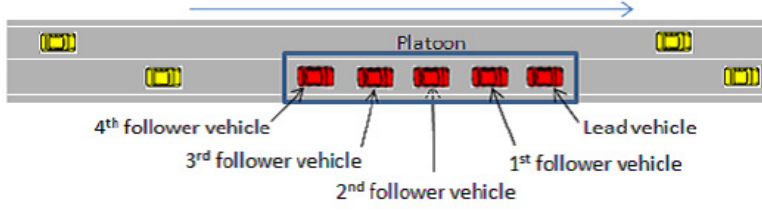


図 4.1: 隊列走行

運転者は、近くにある車両に対して、より強く反応すると考えられる．そこで、感応度には以下の関係が成り立つと考える．

$$a_1 > a_2 > \cdots > a_m \quad (4.2)$$

a_j は添え字 j が小さいほど近い車両に対する感応度を示している．したがって、式 (4.2) は直前車両に対する感応度が最も強いことを意味している．

4.2.2 安定性解析

ダイナミクス (4.1) において定常状態 $x = x_0$ を考え、その近傍の微少な摂動 y_n について考える．

$$x_n = x_0 + y_n \quad (4.3)$$

式 (4.3) をダイナミクス (4.1) へ代入すると次式を得る．

$$\ddot{y}_n(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^m a_j (\dot{y}_{n-j}(t) - \dot{y}_n(t)) \quad (4.4)$$

y_n のフーリエ級数として以下のものが考えられる．

$$y_k(n, t) = \exp(i\alpha_k n + zt), \quad (4.5)$$

$$\alpha_k = \frac{2\pi}{N} k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.6)$$

式 (4.5) を $z = u + iv$ としてダイナミクス (4.4) へ代入すると、以下の式を得る．

$$e^{\Delta t z} z - \sum_{j=1}^m a_j (e^{ji\alpha_k} - 1) = 0 \quad (4.7)$$

テイラー展開 ($e^{\Delta tz} \cong 1 + \Delta tz$) を用いると、式 (4.7) は以下ようになる。

$$\Delta tz^2 + z - \sum_{j=1}^m a_j (e^{j i \alpha_k} - 1) = 0 \quad (4.8)$$

式 (4.8) の解である z の実部が正 ($u > 0$) のとき、式 (4.5) を吟味すると y_k の値は時間経過により発散してしまうため、ダイナミクス (4.1) は不安定となってしまう。 z の実部が負 ($u < 0$) のとき、式 (4.5) を吟味すると y_k の値は時間経過により 0 に収束するため、ダイナミクス (4.1) は安定である。 z の実部が 0 ($u = 0$) のとき、ダイナミクス (4.1) は臨界状態である。

ダイナミクス (4.1) の安定条件を求めるために、まず臨界点を求めることにする。臨界点では z の実部が 0 ($u = 0$)、つまり z は純虚数となる。 $z = ip$ とし、式 (4.8) に代入すると以下の式を得る。

$$(-\Delta tp^2 + \sigma_c) + i(p - \sigma_s) = 0 \quad (4.9)$$

ただし

$$\sigma_c = \sum_{j=1}^m a_j (1 - \cos(\alpha_k j)), \quad \sigma_s = \sum_{j=1}^m a_j \sin(\alpha_k j) \quad (4.10)$$

式 (4.9) より、以下の連立方程式を得る。

$$\begin{cases} -\Delta tp^2 + \sigma_c = 0 \\ p - \sigma_s = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

連立方程式 (4.11) より p を消去すると以下の条件を得る。

$$\Delta t = \frac{\sigma_c}{\sigma_s^2} \quad (4.12)$$

$\Delta t = 1$ とすると式 (4.12) は以下ようになる。

$$1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_s^2} \quad (4.13)$$

$m = 1$ の場合 式 (4.13) は以下ようになる。

$$a_1 = \frac{1}{2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.14)$$

式 (4.14) を極座標系でプロットした特異曲線を図 4.2 に示す。図 4.2 の極座標平面において特異曲線が安定領域と不安定領域との境界線となり、これより左側が安定領域となる。ここで、式 (4.8) の解が安定となるためには、すべての α_k に対して z の実部である u が $u < 0$

となる必要がある．図 4.2 より式 (4.8) の右辺において $\alpha_k = 0$ とすると，それが a_1 の上限を与える．つまり安定条件は以下ようになる．

$$a_1 < \frac{1}{2} \quad (4.15)$$

また，式 (4.12) において，同様に $\alpha_k = 0$ として安定条件を求めると以下ようになる．

$$a_1 < \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.16)$$

$m = 2$ の場合 式 (4.13) は以下ようになる．

$$1 = \frac{a_1 + 2a_2(1 + \cos \alpha_k)}{2(a_1 + 2a_2 \cos \alpha_k)^2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.17)$$

ここで， $a_2/a_1 = 1/2$ とすると，式 (4.17) は以下ようになる．

$$a_1 = \frac{2 + \cos \alpha_k}{2(1 + \cos \alpha_k)^2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.18)$$

式 (4.18) を極座標系でプロットした特異曲線を図 4.3 に示す．図 4.3 より式 (4.18) の右辺において $\alpha_k = 0$ とすると，それが a_1 の上限を与える．つまり安定条件は以下ようになる．

$$\left. \begin{array}{l} a_1 < \frac{3}{8} \\ a_2 < \frac{3}{16} \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

式 (4.19) より，以下の安定条件が得られる．

$$a_1 + a_2 < \frac{9}{16} \quad (4.20)$$

また，式 (4.12) において，同様に $\alpha_k = 0$ として安定条件を求めると以下ようになる．

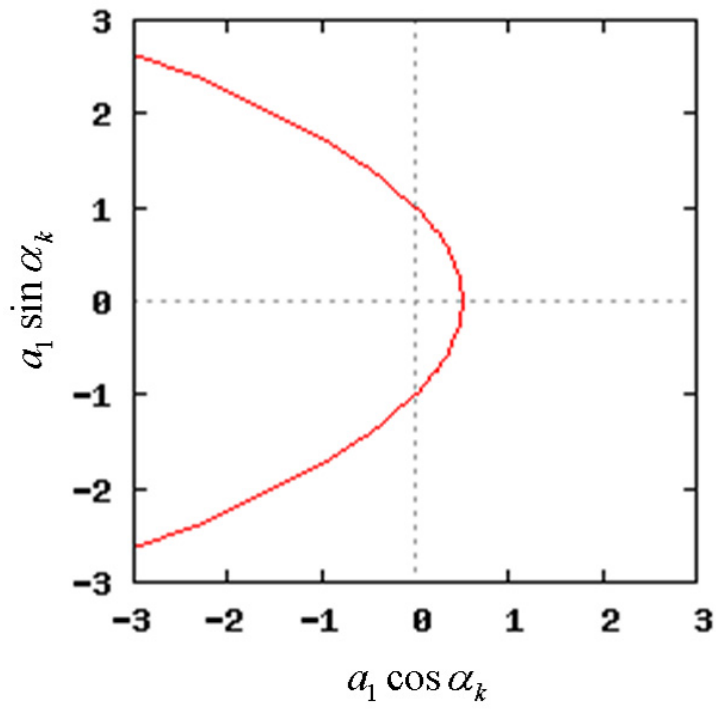
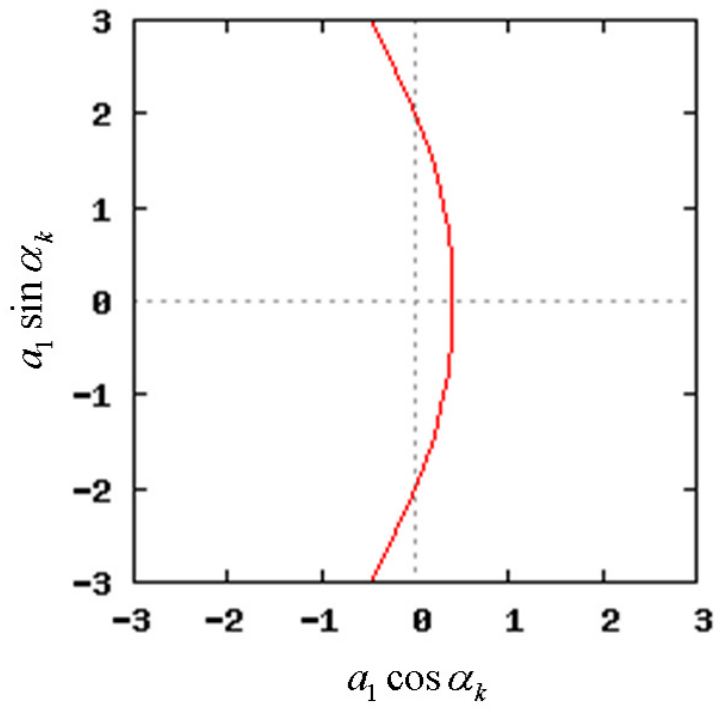
$$\frac{(a_1 + 2a_2)^2}{a_1 + 4a_2} < \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.21)$$

$m = 3$ の場合 式 (4.13) は以下ようになる．

$$1 = \frac{a_1 + 2a_2(1 + \cos \alpha_k) + a_3(4 \cos^2 \alpha_k + 4 \cos \alpha_k + 1)}{2\{a_1 + 2a_2 \cos \alpha_k + a_3(4 \cos^2 \alpha_k - 1)\}^2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.22)$$

ここで， $a_2/a_1 = 2/3$, $a_3/a_1 = 1/3$ とすると，式 (4.22) は以下ようになる．

$$a_1 = \frac{1 + \frac{4}{3}(1 + \cos \alpha_k) + \frac{1}{3}(4 \cos^2 \alpha_k + 4 \cos \alpha_k + 1)}{2\{1 + \frac{4}{3} \cos \alpha_k + \frac{1}{3}(4 \cos^2 \alpha_k - 1)\}^2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.23)$$

図 4.2: 特性曲線 ($m = 1$)図 4.3: 特性曲線 ($m = 2$)

式 (4.23) を極座標系でプロットした特異曲線を図 4.4 に示す．図 4.4 より式 (4.23) の右辺において $\alpha_k = 0$ とすると，それが a_1 の上限を与える．つまり安定条件は以下ようになる．

$$\left. \begin{aligned} a_1 &< \frac{3}{10} \\ a_2 &< \frac{1}{5} \\ a_3 &< \frac{1}{10} \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

式 (4.24) より以下の安定条件が得られる．

$$a_1 + a_2 + a_3 < \frac{3}{5} \quad (4.25)$$

また，式 (4.12) において，同様に $\alpha_k = 0$ として安定条件を求めると以下ようになる．

$$\frac{(a_1 + 2a_2 + 3a_3)^2}{a_1 + 4a_2 + 9a_3} < \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.26)$$

$m = 4$ の場合 式 (4.13) は以下ようになる．

$$1 = \frac{a_1 + 2a_2(1 + \cos \alpha_k) + a_3(4 \cos^2 \alpha_k + 4 \cos \alpha_k + 1) + 4a_4(1 + \cos \alpha_k)(1 + \cos 2\alpha_k)}{2\{a_1 + 2a_2 \cos \alpha_k + a_3(4 \cos^2 \alpha_k - 1) + 4a_4 \cos \alpha_k \cos 2\alpha_k\}^2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.27)$$

ここで， $a_2/a_1 = 3/4$ ， $a_3/a_1 = 2/4$ ， $a_4/a_1 = 1/4$ とすると，式 (4.27) は以下ようになる．

$$a_1 = \frac{1 + \frac{3}{2}(1 + \cos \alpha_k) + \frac{1}{2}(4 \cos^2 \alpha_k + 4 \cos \alpha_k + 1) + (1 + \cos \alpha_k)(1 + \cos 2\alpha_k)}{2\{1 + \frac{3}{2} \cos \alpha_k + \frac{1}{2}(4 \cos^2 \alpha_k - 1) + \cos \alpha_k \cos 2\alpha_k\}^2 \cos^2(\alpha_k/2)} \quad (4.28)$$

式 (4.28) を極座標系でプロットした特異曲線を図 4.5 に示す．図 4.5 より式 (4.28) の右辺において $\alpha_k = 0$ とすると，それが a_1 の上限を与える．つまり安定条件は以下ようになる．

$$\left. \begin{aligned} a_1 &< \frac{1}{4} \\ a_2 &< \frac{3}{16} \\ a_3 &< \frac{1}{8} \\ a_4 &< \frac{1}{16} \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

式 (4.29) より，以下の安定条件が得られる．

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 < \frac{5}{8} \quad (4.30)$$

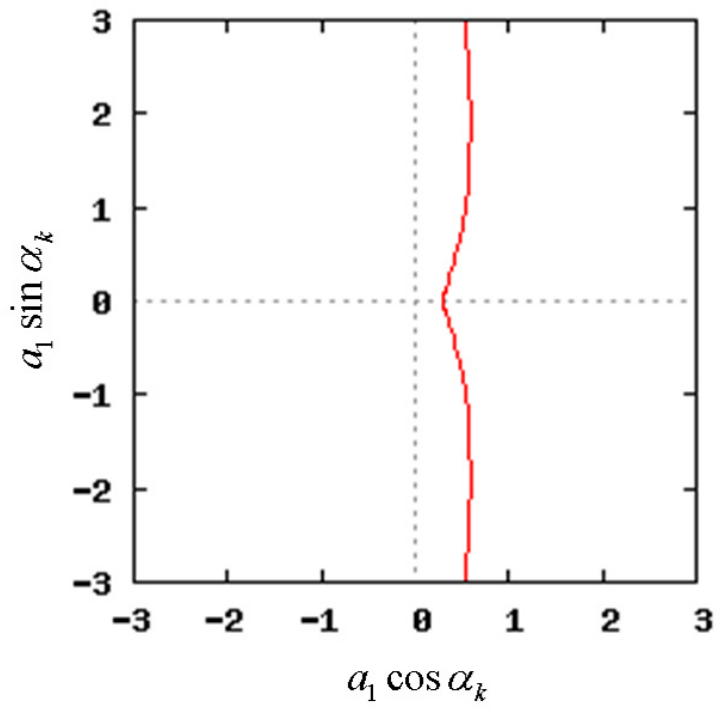
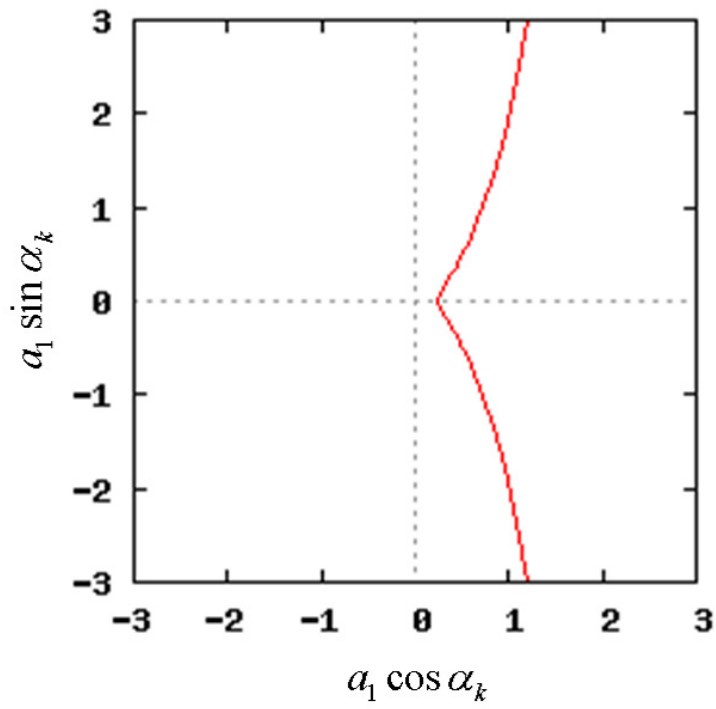
図 4.4: 特性曲線 ($m = 3$)図 4.5: 特性曲線 ($m = 4$)

表 4.1: シミュレーションにおける感応度の設定

$m = 1$	$a_1 = 0.40$
$m = 2$	$a_1 = 0.26667, a_2 = 0.13333$
$m = 3$	$a_1 = 0.20, a_2 = 0.13333, a_3 = 0.06667$
$m = 4$	$a_1 = 0.16, a_2 = 0.12, a_3 = 0.08, a_4 = 0.04$

また，式 (4.12) において，同様に $\alpha_k = 0$ として安定条件を求めると以下ようになる．

$$\frac{(a_1 + 2a_2 + 3a_3 + 4a_4)^2}{a_1 + 4a_2 + 9a_3 + 16a_4} < \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.31)$$

4.2.3 考察

安定条件 (4.15)，(4.20)，(4.25)，(4.30) より，参照する車両が増えるにしたがって特異曲線が右へ膨らみ，安定領域が大きくなっていることがわかる．

また，式 (4.16)，(4.21)，(4.26)，(4.31) より安定条件を一般化すると以下ようになる．

$$\frac{(\sum_{j=1}^m j a_j)^2}{\sum_{j=1}^m j^2 a_j} < \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.32)$$

4.3 数値解析例

前方車両に対する感応度は，第 4.2 章で述べた条件に従って定める．まず，遅れ時間を $\Delta t = 1$ とする．式 (4.16) より， $m = 1$ のときの感応度 a_1 は次式を満足しなければならない．

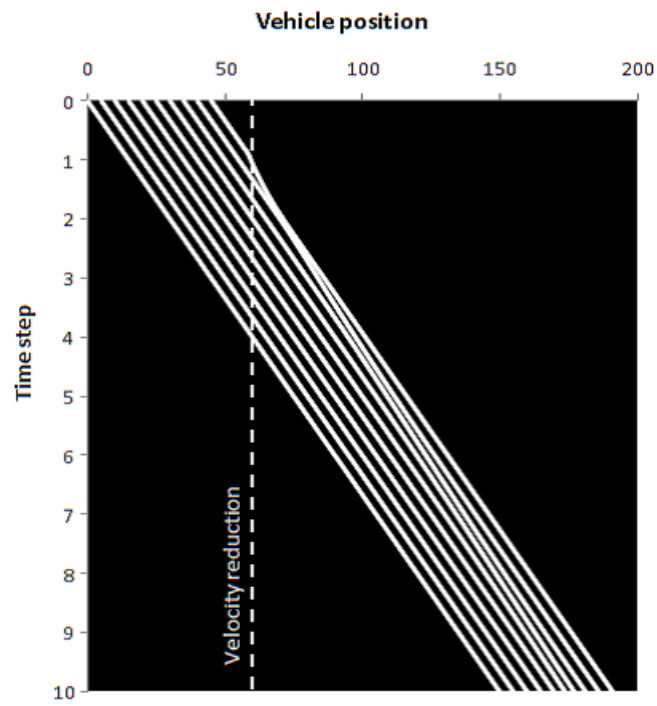
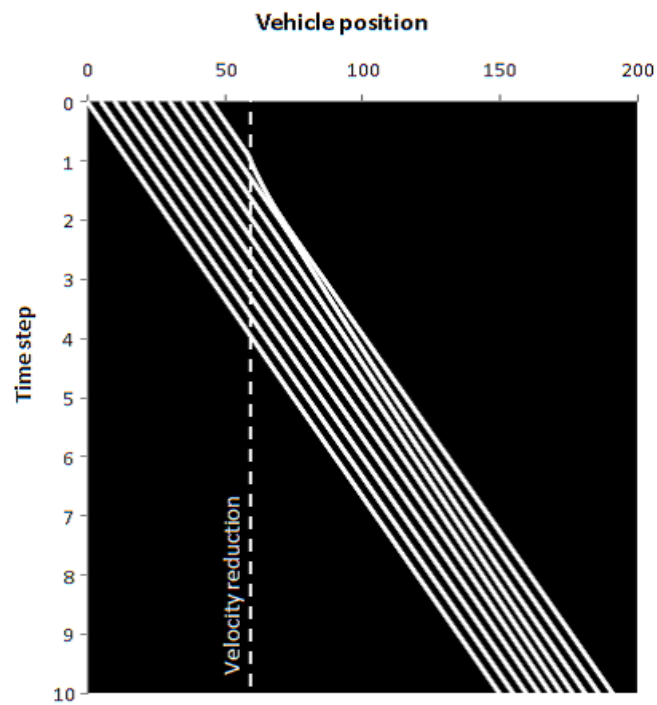
$$a_1 < 0.5 \quad (4.33)$$

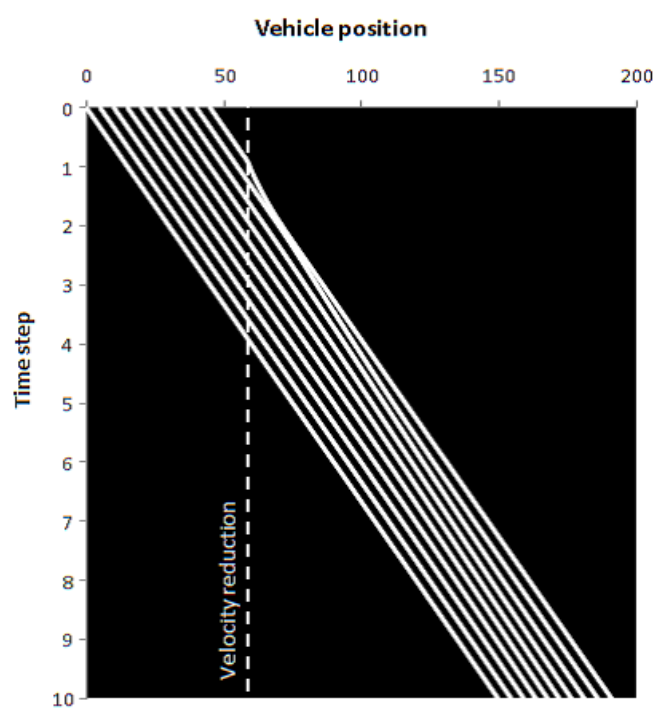
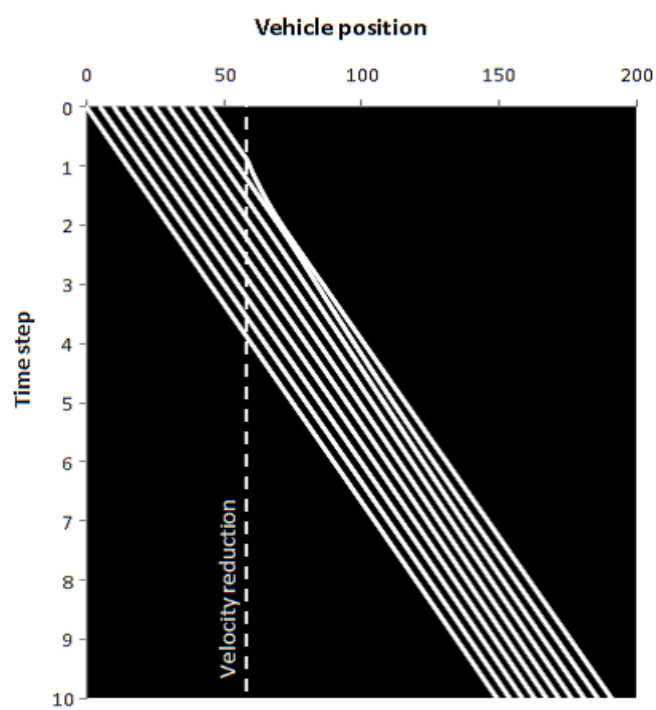
そこで，ここでは $a_1 = 0.4$ を採用する． $m = 2, 3, 4$ の場合については，前方車両に対する感応度の総和は， $m = 1$ における前方車両に対する感応度 $a_1 = 0.4$ と等しいとする．つまり，

$$\sum_{i=1}^m a_i = 0.40 \quad (m = 1, 2, 3, 4) \quad (4.34)$$

さらに，感応度の間には式 (4.2) の関係を仮定している．以上のことから，感応度を表 4.1 に示すように定めてシミュレーションを行う．

シミュレーション対象として，片側 1 車線道路を 10 台の車両が連なって走行する状態を考える．各車両の初期速度を $15(\text{m/s})$ とする．先頭車両は，時刻 $t = 1$ において突然速度

図 4.6: 交通シミュレーションの結果 ($m=1$)図 4.7: 交通シミュレーションの結果 ($m=2$)

図 4.8: 交通シミュレーションの結果 ($m = 3$)図 4.9: シミュレーションの結果 ($m = 4$)

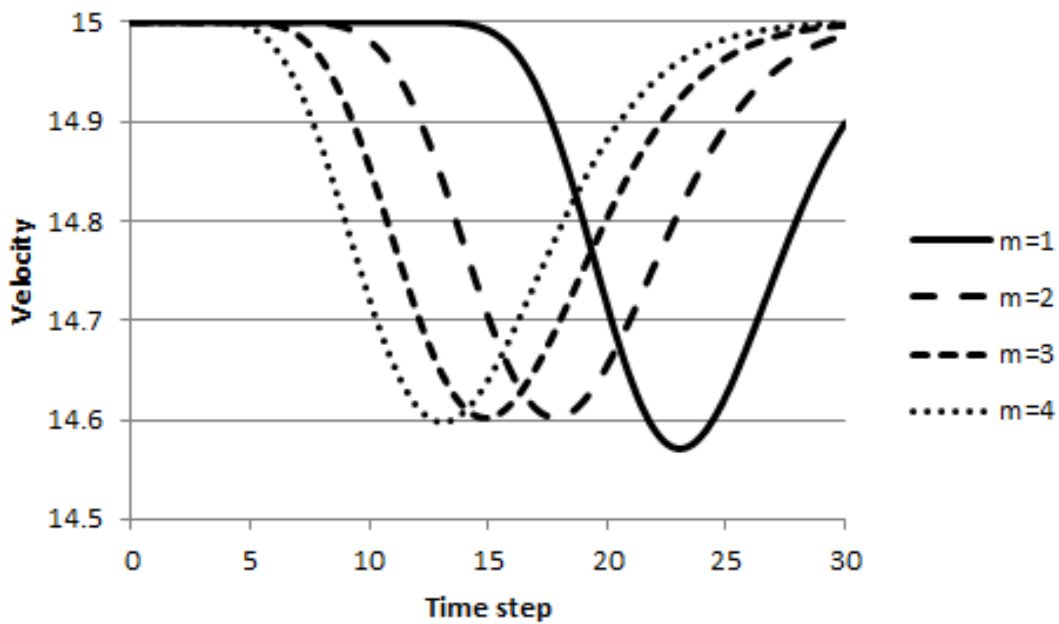


図 4.10: 最後尾車両の速度

を $10(\text{m/s})$ まで減速する．その後，加速度 $0.5(\text{m/s}^2)$ で $15(\text{m/s})$ まで再加速したあと，等速度運動する． $m = 1$ の場合，先頭車両以外のすべての追従車両は，前方車両と自車両の速度差に応じて自車両の加速度を制御する． $m = 2$ の場合，先頭車両の直後の追従車両は $m = 1$ のルールに，そのほかの追従車両は $m = 2$ のルールに応じて自車両の加速度を制御する．同様に， $m = 3, 4$ の場合においても，追従車両は参照できる前方車両台数に応じた加速度制御を行うこととする．1 タイムステップは実時間で $0.1(\text{s})$ としてシミュレーションを行う．

交通流のシミュレーション結果を図 4.6 から 4.9 に示す．これらの図で，横軸は車両位置を，縦軸はタイムステップを示している．どの場合においても，先頭車両の速度が大きく低下したとき，先頭車両の直後の追従車両が大きく先頭車両に近づいていることがわかる．しかし，追従車両とその直前方車両との車間距離は， m が大きくなるにしたがって変化が小さくなっている．これは， m が大きいほど，追従車両の速度低下の開始時点が早まっていることを示している．

そこで，10 台目の車両の速度変動の比較を図 4.10 に示す．横軸にはタイムステップを，縦軸には速度を示す． $m = 1$ と比べて， $m = 2, 3, 4$ では最低速度が大きくなっていることがわかる．また， m が大きいほど速度低下が最大となるタイムステップが早まっており，そ

のため，もとの速度に回復するまでの時間も早まっていることがわかる．

4.4 まとめ

本論文では，前方の複数車両を参照できるときに，その交通流の安定化に与える影響を検討した．そのために，交通流を Chandler タイプの多台参照追従モデルによって表現した．

最初に，モデルについて安定性解析を行い，参照する前方車両の台数を増やせば交通流がより安定することを理論的に確認した．つづいて，10 台の車両が連続して走行する交通シミュレーションを行った．その結果，参照車両台数が大きいほど，後続する追従車両は早い段階で速度制御を始めるので，交通流を安定して制御できることがわかった．

第5章 ETCゲートに進入する隊列走行車両 の交通シミュレーション

5.1 はじめに

前章において、隊列走行する車両群の交通シミュレーションについて述べた。本章では、この車両群が順番に ETC ゲートに進入する場合の交通シミュレーションを考える。

5.2 車両追従モデルの安定性解析

5.2.1 車両追従モデル

前章と同じく、5 台の車両が連続して走行する状態を考える (図 5.1)。先頭より、先頭車両、第 1 追従車両、第 2 追従車両、第 3 追従車両、第 4 追従車両とする。

車両の速度制御には Chandler モデルと、それを多台参照追従モデルとした拡張 Chandler モデルを用いる。Chandler モデルは次式で与えられる。

$$\ddot{x}_n(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^m a_j (\dot{x}_{n-j}(t) - \dot{x}_n(t)) \quad (5.1)$$

ここで、 $x_n(t) > 0$ は時間 t における n 番目の車両位置を示す。 $\Delta t > 0$ は遅れ時間を $a_j > 0$ は n 番目の車両の運転者の $(n - j)$ 番目の車両に対する反応を示す反応度である。パラメータ m は参照する車両台数である。

前章の結果より、式 (5.1) の安定条件は次式で与えられる。

$$\Delta t = \frac{\sigma_c}{\sigma_s^2} \quad (5.2)$$

ここで

$$\sigma_c = \sum_{j=1}^m a_j \{1 - \cos(j\alpha_k)\} \quad (5.3)$$

$$\sigma_s = \sum_{j=1}^m a_j \sin(j\alpha_k) \quad (5.4)$$

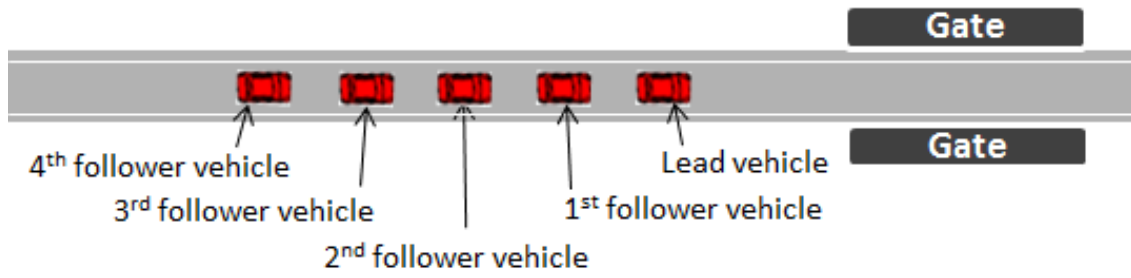


図 5.1: 隊列走行



図 5.2: 第 1 追従車両

5.2.2 参照車両群に対する反応度

追従車両は、それぞれ 1 台から 4 台の先導車を持つ。先導車のことを車両追従モデルにおいて参照するという意味から参照車両群と呼ぶことにする。ここでは、参照車両群に対する反応度について検討する。参照車両群に対する反応度を次式で定義することにする。

$$b_m = \sum_{j=1}^m a_j \quad (5.5)$$

第 1 追従車両

第 1 追従車両にとって、参照車両は先頭車両だけである (図 5.2)。前章の結果より、式 (5.2) で $m = 1$ とおき、 $\alpha_k = 0$ 、 $\Delta t = 1$ とすれば次式を得る。

$$0 \leq a_1 \leq \frac{1}{2}. \quad (5.6)$$

したがって、この場合の参照車両群に対する反応度は次式となる。

$$b_1 = a_1 = \frac{1}{2} \quad (5.7)$$

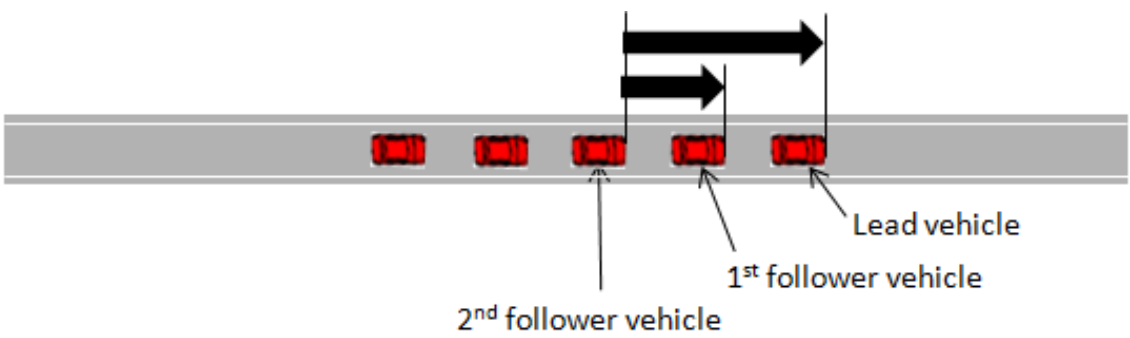


図 5.3: 第 2 追従車両

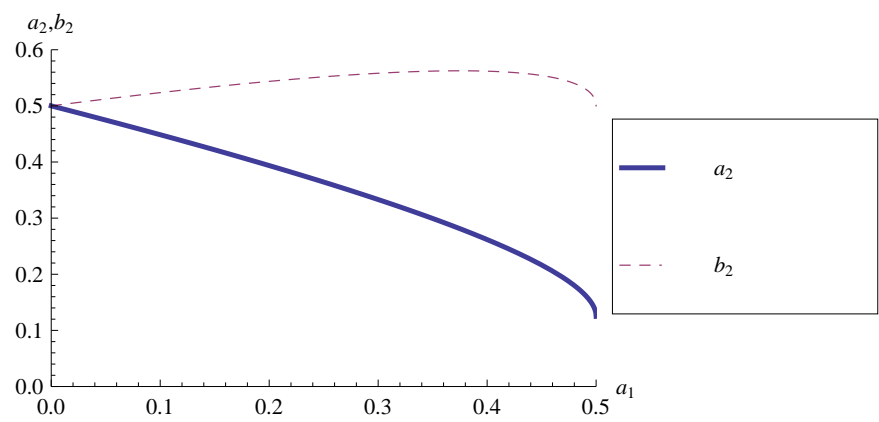


図 5.4: 第 2 追従車両から参照車両群に対する反応度

第2 追従車両

第2 追従車両は2 台の参照車両を持つ (図 5.3) . 前章の結果より, 式 (5.2) で $m = 2$ とおき, $\alpha_k = 0$, $\Delta t = 1$ とすれば次式を得る .

$$8a_2^2 + 4(2a_1 - 1)a_2 + (2a_1^2 - a_1) \leq 0. \quad (5.8)$$

反応度 a_1 と a_2 は正の実数でなければならいから, 次の関係が成り立つ .

$$0 \leq a_1 \leq \frac{1}{2} \quad (5.9)$$

さらに, 反応度 a_2 は式 (5.8) より次のように求めることができる .

$$0 \leq a_2 \leq \frac{(1 - 2a_1) + \sqrt{1 - 2a_1}}{4} \quad (5.10)$$

したがって, この場合の参照車両群に対する反応度は次式となる .

$$b_2 \equiv a_1 + a_2 \leq \frac{(1 + 2a_1) + \sqrt{1 - 2a_1}}{4}. \quad (5.11)$$

横軸に a_1 をとって, 反応度 a_2 と b_2 を図示すると図 5.4 を得る . この図より, $a_1 = 0$ において a_2 は最大値 $(a_2)_{\max} = 1/2$ をとることが分かる . 一方, $a_1 = 3/8$ と $a_2 = 3/16$ のときに, b_2 は最大値 $(b_2)_{\max} = 9/16$ をとることが分かる .

第3 追従車両

第3 追従車両は3 台の参照車両を持つ (図 5.5) . 前章の結果より, 式 (5.2) で $m = 3$ とおき, $\alpha_k = 0$, $\Delta t = 1$ とすれば次式を得る .

$$18a_3^2 + (12a_1 + 24a_2 - 9)a_3 + (2a_1^2 + 8a_2^2 + 8a_1a_2 - a_1 - 4a_2) \leq 0. \quad (5.12)$$

a_1, a_2, a_3 は正の実数でなければならないので, 次の条件を得る .

$$0 \leq a_1 + a_2 \equiv b_2 \leq \frac{9}{16} \quad (5.13)$$

$$0 \leq a_3 \leq \frac{(3 - 4a_1 - 8a_2) + \sqrt{9 - 16(a_1 + a_2)}}{12} \quad (5.14)$$

したがって, この場合の参照車両群に対する反応度は次式となる .

$$b_3 \equiv a_1 + a_2 + a_3 \leq \frac{(3 + 8a_1 + 4a_2) + \sqrt{9 - 16(a_1 + a_2)}}{12} \quad (5.15)$$

反応度 a_3 と b_3 を図 5.6 に示す . 反応度 a_3 は, $a_1 = a_2 = 0$ において最大値 $(a_3)_{\max} = 1/2$ をとる . 一方, 反応度 b_3 は, $a_1 = 1/2$, $a_2 = 0$, $a_3 = 1/6$ において最大値 $(b_3)_{\max} = 2/3$ をとる .

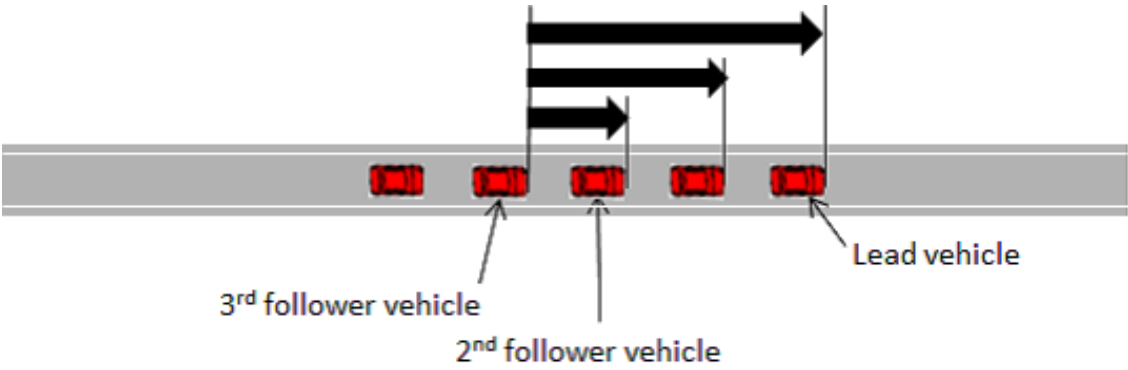


図 5.5: 第 3 追従車両

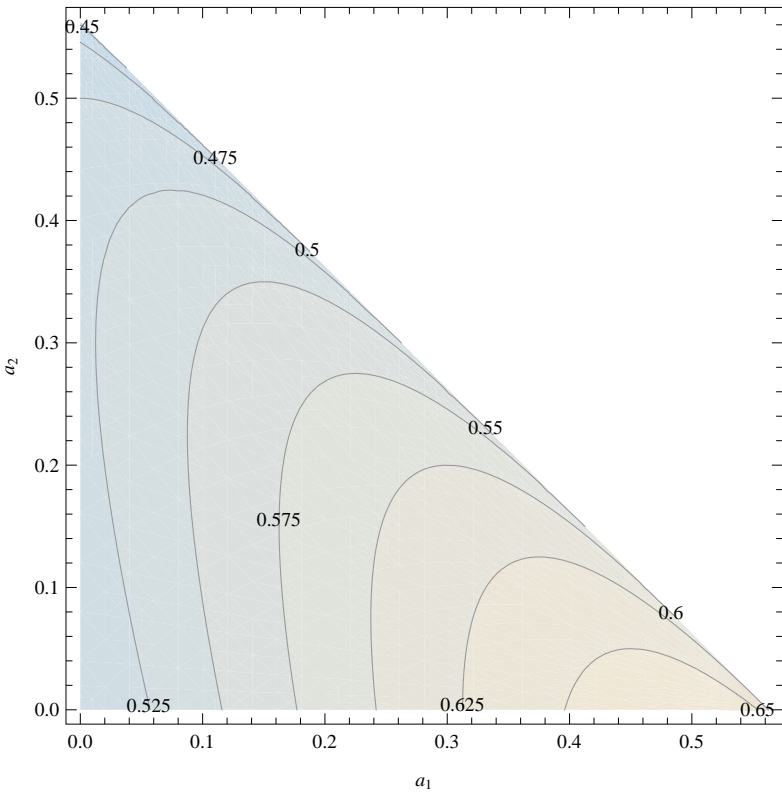


図 5.6: 第 3 追従車両から参照車両群に対する反応度

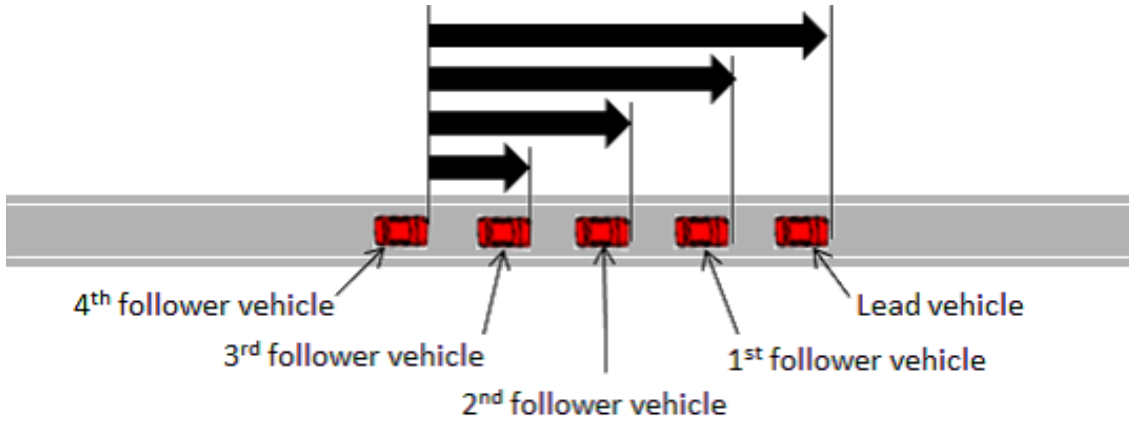


図 5.7: 第 4 追従車両

第 4 追従車両

第 4 追従車両は 4 台の参照車両を持っている (図 5.7) . 前章の結果より , 式 (5.2) で $m = 4$ とおき , $\alpha_k = 0$, $\Delta t = 1$ とすれば次式を得る .

$$\begin{aligned}
 & 32a_4^2 + (16a_1 + 32a_2 + 48a_3 - 16)a_4 + 2a_1^2 + 8a_2^2 + 18a_3^2 \\
 & + 8a_1a_2 + 12a_1a_3 + 24a_2a_3 - a_1 - 4a_2 - 9a_3 \leq 0.
 \end{aligned} \quad (5.16)$$

a_1, a_2, a_3, a_4 は正の実数でなければならいから , 次の条件を得る .

$$0 \leq 3a_1 + 4a_2 + 3a_3 \leq 2 \quad (5.17)$$

$$0 \leq a_4 \leq \frac{2(1 - a_1 - 2a_2 - 3a_3) + \sqrt{2(2 - 3a_1 - 4a_2 - 3a_3)}}{8} \quad (5.18)$$

したがって , この場合の参照車両群に対する反応度は次式となる .

$$\begin{aligned}
 b_4 & \equiv a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \\
 & \leq \frac{2(1 + 3a_1 + 2a_2 + a_3) + \sqrt{2(2 - 3a_1 - 4a_2 - 3a_3)}}{8}
 \end{aligned} \quad (5.19)$$

反応度 a_4 は , $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ において最大値 $(a_4)_{\max} = 1/2$ をとる . 一方 , 反応度 b_4 は , $a_1 = 1/2$, $a_2 = 0$, $a_3 = 0$, $a_4 = 1/4$ において , 最大値 $(b_4)_{\max} = 3/4$ をとる .

5.2.3 参照車両群に対する感応度

以上の結果をまとめ直すと表 5.1 のようになる . これらの結果より , $m = 3$ の場合においては $a_2 = 0$ であり , $m = 4$ の場合においては $a_2 = a_3 = 0$ であることがわかる . つまり ,

表 5.1: 参照車両群に対する反応度

Follower Vehicle	Max. total sensitivity	Sensitivities
1st	$(b_1)_{\max} = (a_1)_{\max} = \frac{1}{2}$	—
2nd	$(b_2)_{\max} = \frac{9}{16}$	$a_1 = \frac{3}{8}, a_2 = \frac{3}{16}$
3rd	$(b_3)_{\max} = \frac{2}{3}$	$a_1 = \frac{1}{2}, a_2 = 0, a_3 = \frac{1}{6}$
4th	$(b_4)_{\max} = \frac{3}{4}$	$a_1 = \frac{1}{2}, a_2 = 0, a_3 = 0, a_4 = \frac{1}{4}$

隊列走行する車両群の場合，各車両が自車両にとっての参照車両群に対する感応度を最大化する場合，参照すべき車両は先頭車両と直前方車両の 2 台だけでよいことがわかる．

ところで，上記の結果には一つ注意すべきことがある．このモデルでは，各車両が Chandler モデルによって相互に関連した速度制御をしていることが前提になっていることである．例えば，隊列走行する車両群のある 1 台が前方車両に対して Chandler モデルの意味での速度制御を失った場合，上記の結論は必ずしも有効と言えない．もちろん，その場合には，Chandler モデルの意味での速度制御を失った車両より前と，その車両以降を別々の隊列として制御すればよい．

5.3 数値解析例

5.3.1 解析対象

ETC ゲートが配置された片側 1 車線道路を，隊列走行する車両が通過するシミュレーションを考える．先頭車両はゲートの手前では時速 50(km/h) で走行し，ETC ゲートを模した所を通過するときには 40(km/h) で走行する．ETC ゲート通過後は時速 50(km/h) まで加速する．隊列の台数は，5，10，15 台の 3 種類を考える．

シミュレーションでは以下の 3 つのモデルを比較する．

- モデル 1

直前方車両 1 台だけを参照する Chandler モデルによる速度制御アルゴリズム

- モデル 2

直前方車両とその前の車両の 2 台を参照する Chandler モデルによる速度制御アルゴリズム

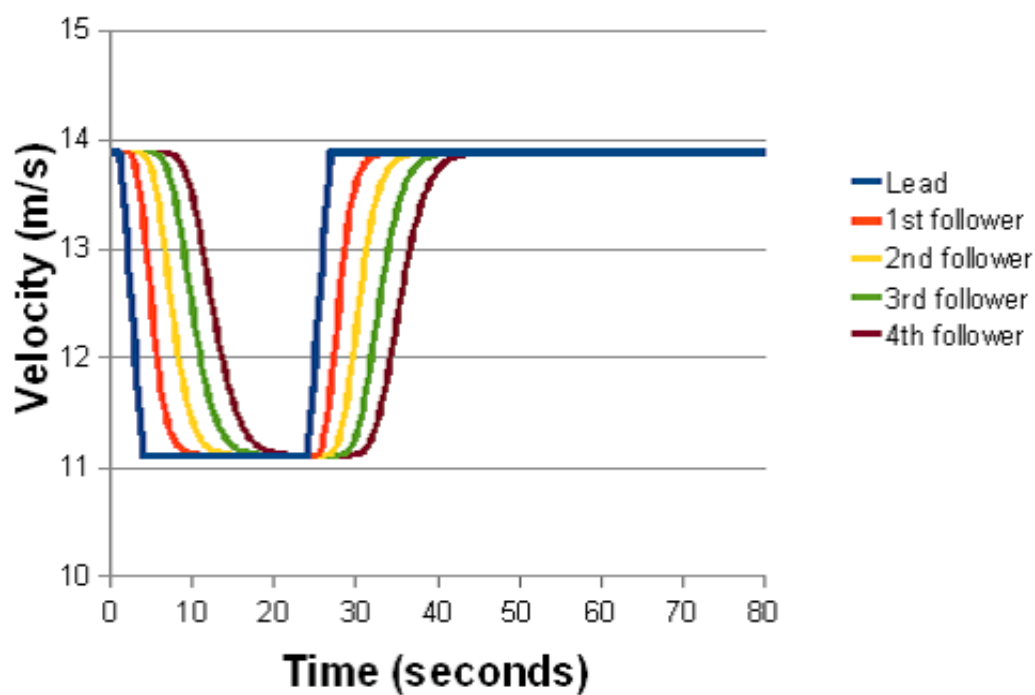


図 5.8: モデル 1 に従う 5 台隊列走行の速度変位図

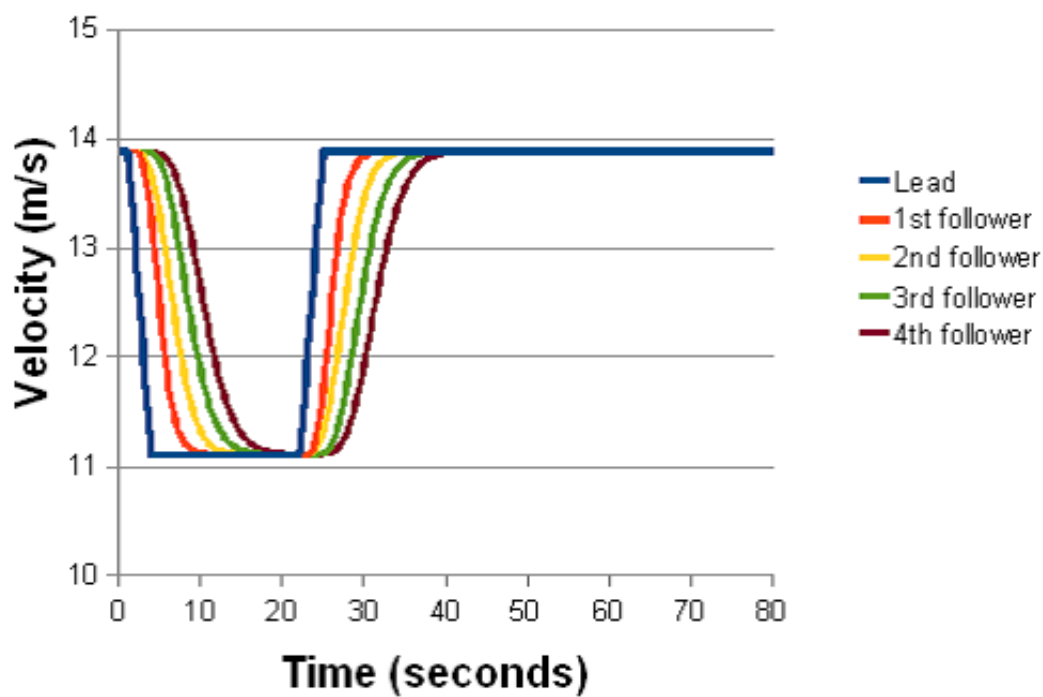


図 5.9: モデル 2 に従う 5 台隊列走行の速度変位図

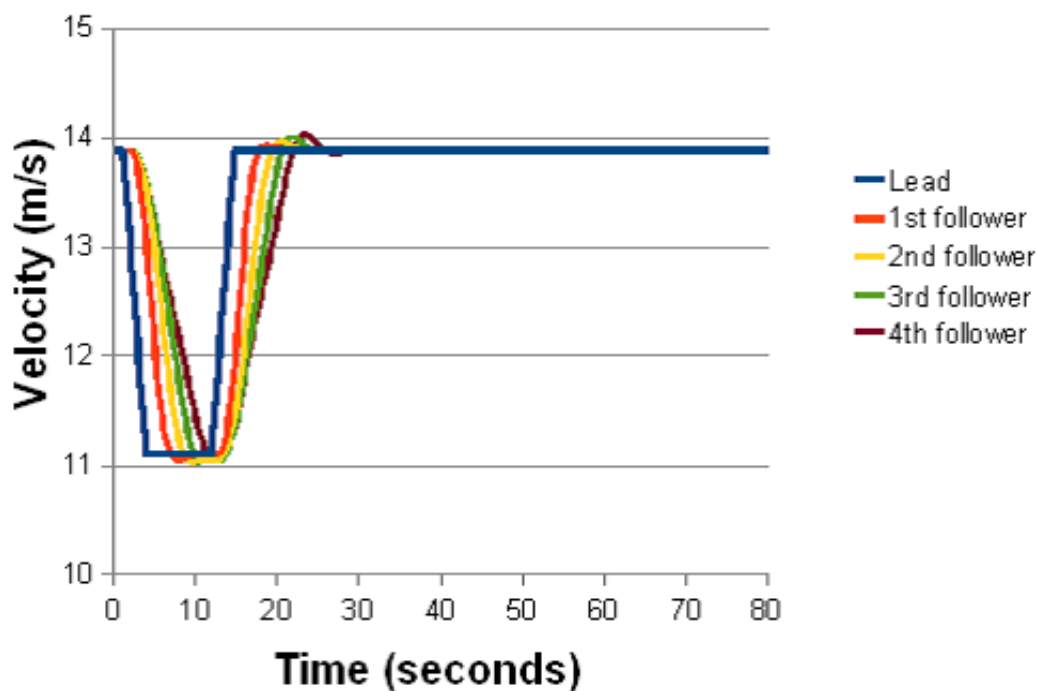


図 5.10: モデル 3 に従う 5 台隊列走行の速度変位図

- モデル 3

隊列の先頭と自車両の直前方車両の 2 台を参照する Chandler モデルによる速度制御アルゴリズム

ただし、モデル 3 において隊列の先頭となるのは、ETC ゲートに進入したばかりの車両である。ETC ゲートに進入したばかりの車両は特定の速度まで強制的に減速されるので、それより前の車両に対しては Chandler モデルの意味で速度制御されることはないからである。

5.3.2 シミュレーション結果

5,10,15 台の車両による隊列走行の結果を図 5.8 から 5.16 に示す。いずれの台数の場合においても、モデル 1 よりモデル 2 が、モデル 2 よりモデル 3 のほうが全ての車両が ETC ゲートを通過する時間が短くなっているのが分かる。

隊列が全て ETC ゲートを通過するにかかる時間を図 5.17 に示す。この結果より、車両台数が少ないほど通過時間が短いこと、車両台数によらずモデル 1 よりモデル 2 が、モデル 2 よりモデル 3 のほうが全ての車両が通過するにかかる時間が短いことが分かる。また、モ

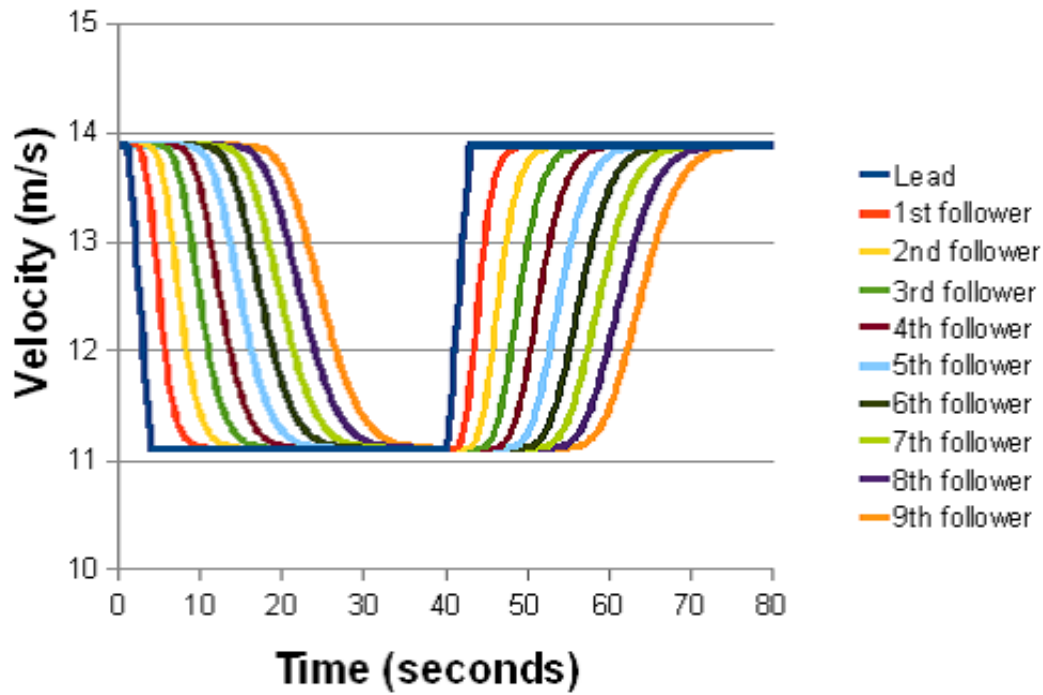


図 5.11: モデル 1 に従う 10 台隊列走行の速度変位図

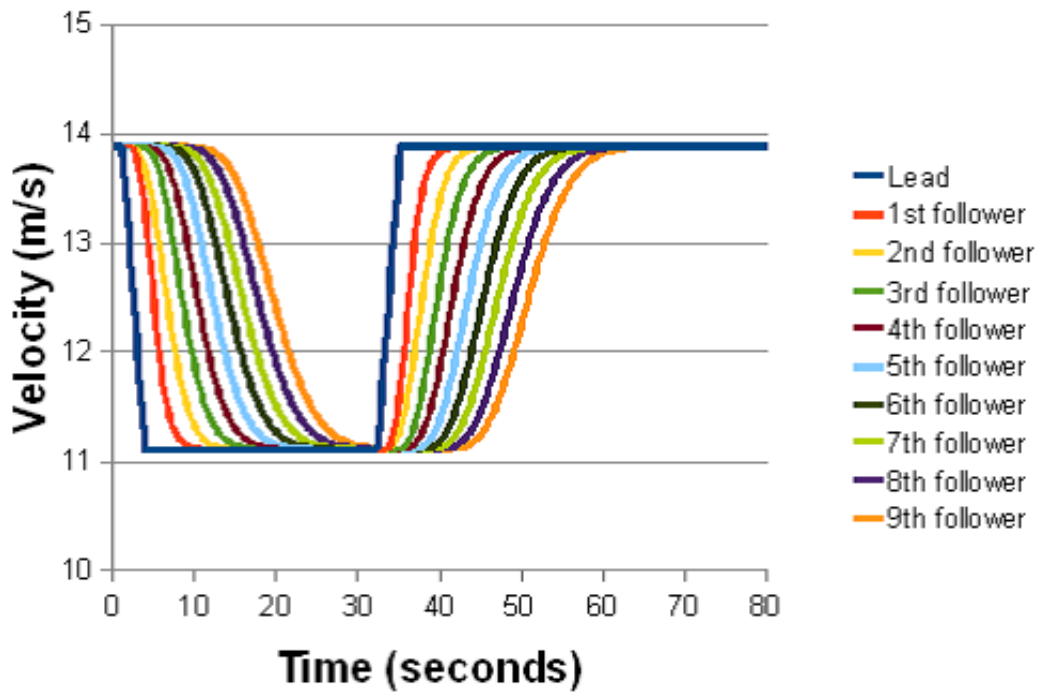


図 5.12: モデル 2 に従う 10 台隊列走行の速度変位図

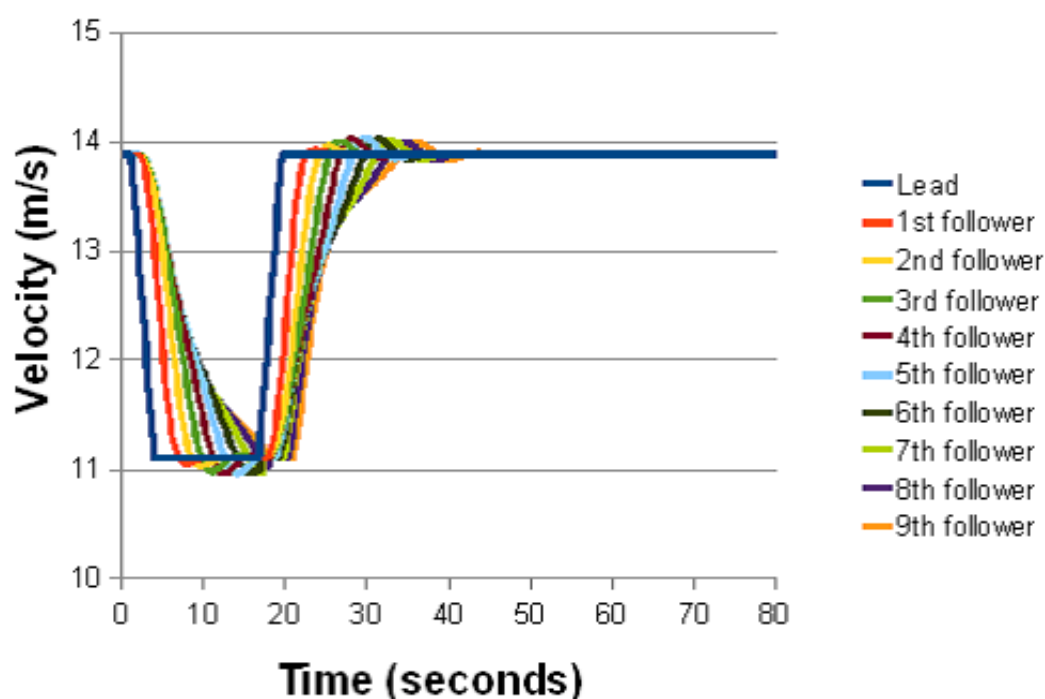


図 5.13: モデル 3 に従う 10 台隊列走行の速度変位図

デル 1 や 2 に比べて，モデル 3 では台数増加による通過所要時間の増加が少ないことが分かる．

また，10 台の車両の隊列走行における時空図を図 5.18 から 5.20 に示す．横軸に車両位置を，縦軸には時間を示す．白い線が左上から右下に伸びている場合，車両が前方に進んでいることを示している．

5.4 まとめ

本章では，隊列走行する車両群が順番に ETC ゲートに進入する場合の交通シミュレーションを行った．交通流を Chandler モデルによってモデル化した．安定性解析の結果得られた関係式から，各車両にとって参照する車両群（参照車両群）に対する反応度を，各参照車両に対する反応度の和として定義した．参照車両群に対する反応度を最大化すると，隊列の先頭と各車両の直前車両以外の車両に対する反応度を無視しても良いことが分かった．そこで，各車両が隊列の先頭車両と自分にとっての直前車両だけを参照するモデルを用いて ETC ゲートを走行する車両群の交通流シミュレーションを行った．各車両が直前方車両だけを参照する場合や前方 2 車両だけを参照する場合に比べて，提案したモデルのほうが

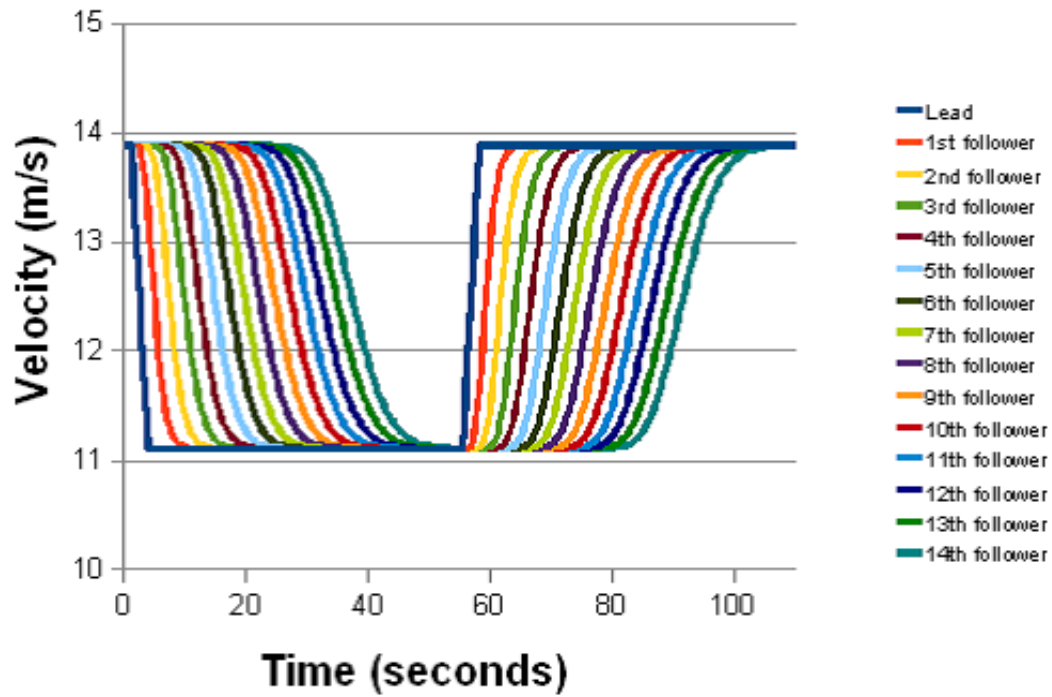


図 5.14: モデル 1 に従う 15 台隊列走行の速度変位図

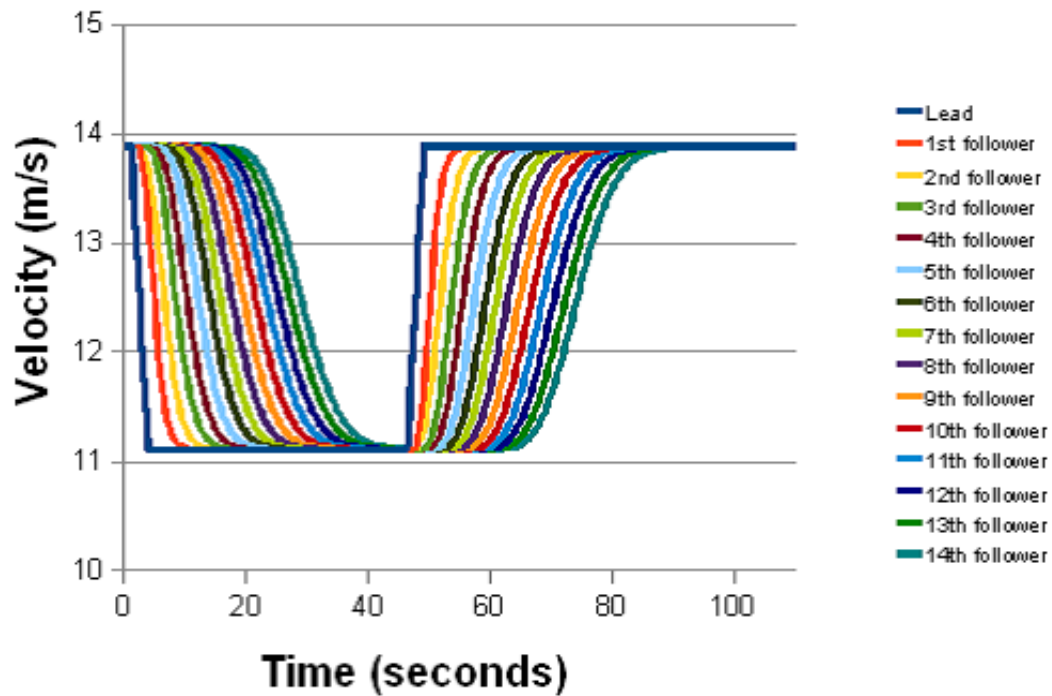


図 5.15: モデル 2 に従う 15 台隊列走行の速度変位図

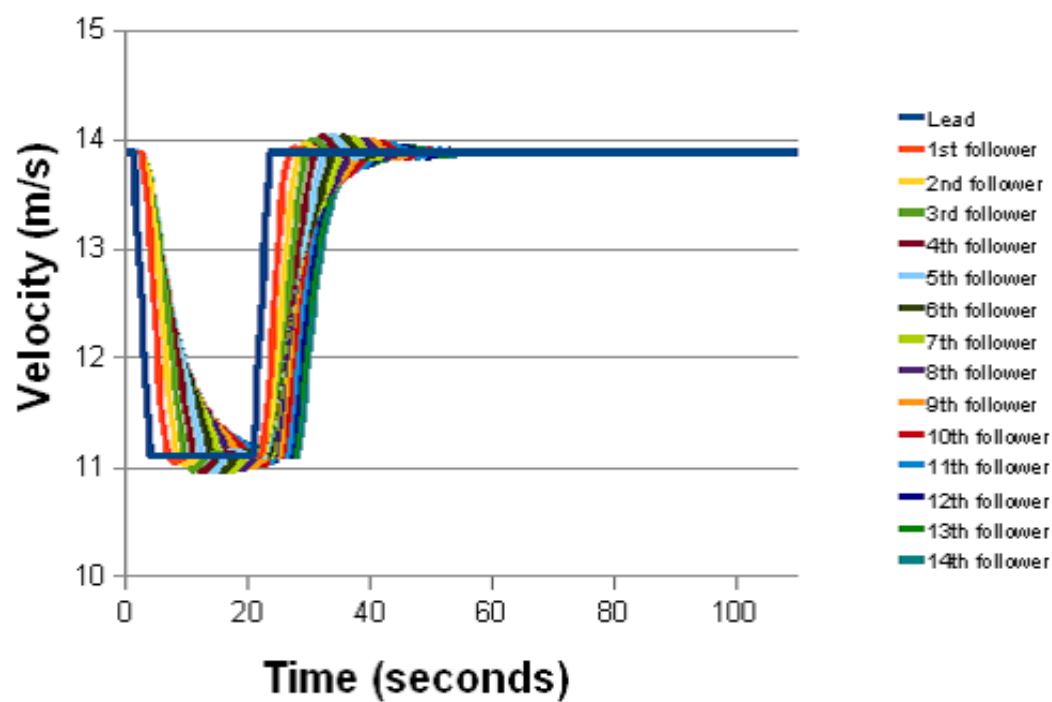


図 5.16: モデル 3 に従う 15 台隊列走行の速度変位図

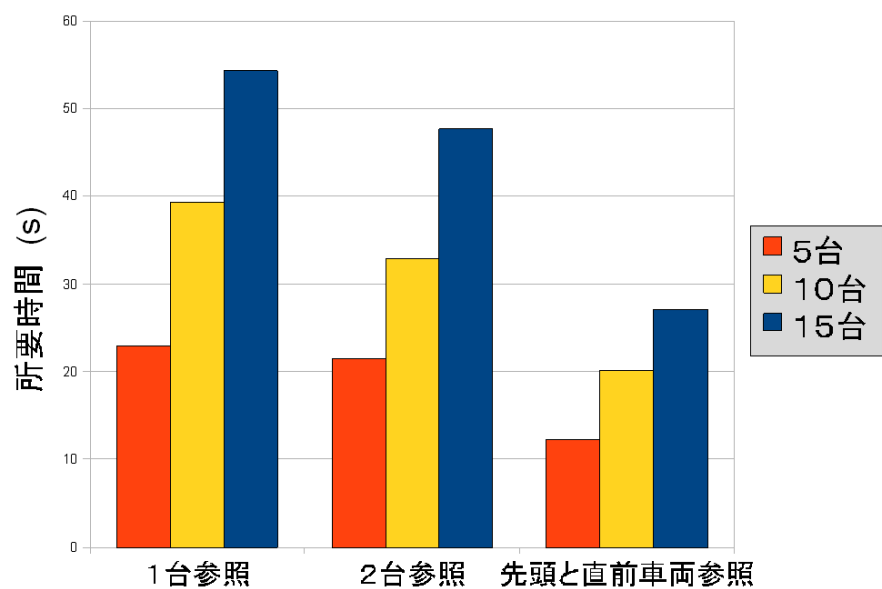


図 5.17: 車群が ETC ゲートを通過するにかかる時間の比較

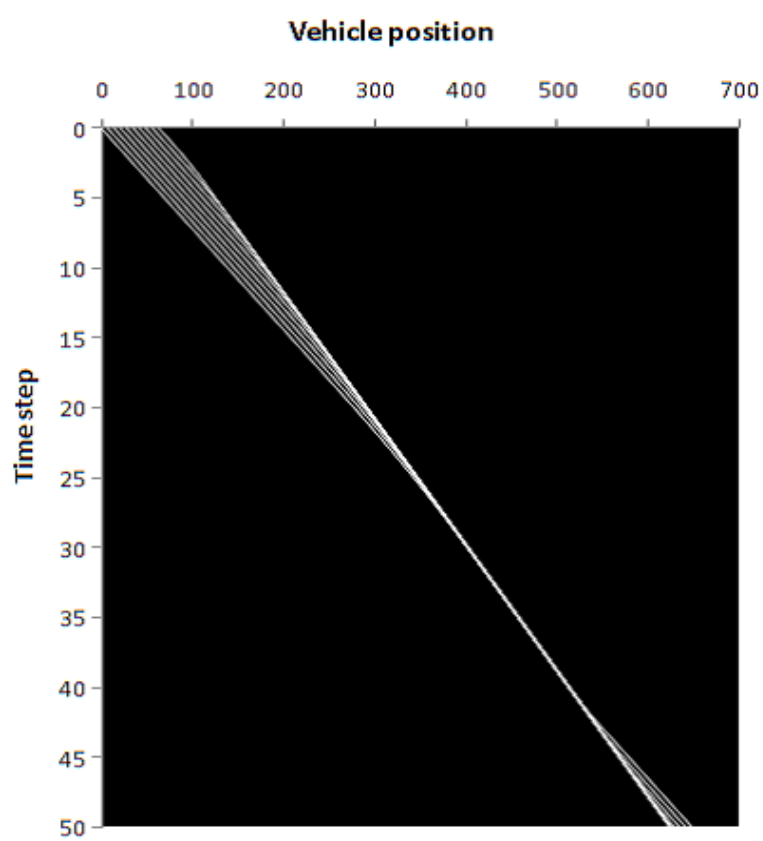


図 5.18: モデル 1 の時空図

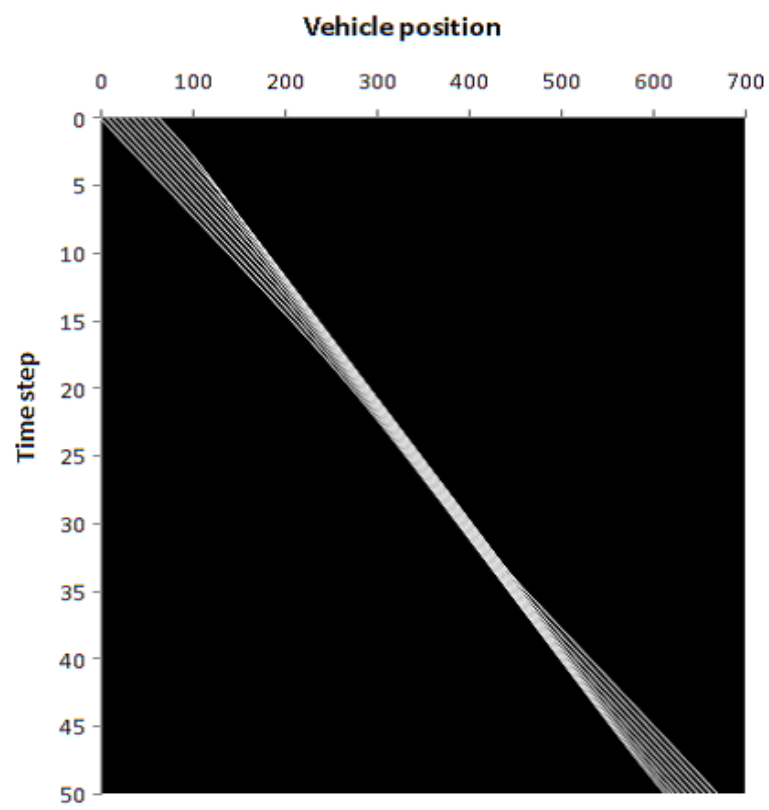


図 5.19: モデル 2 の時空図

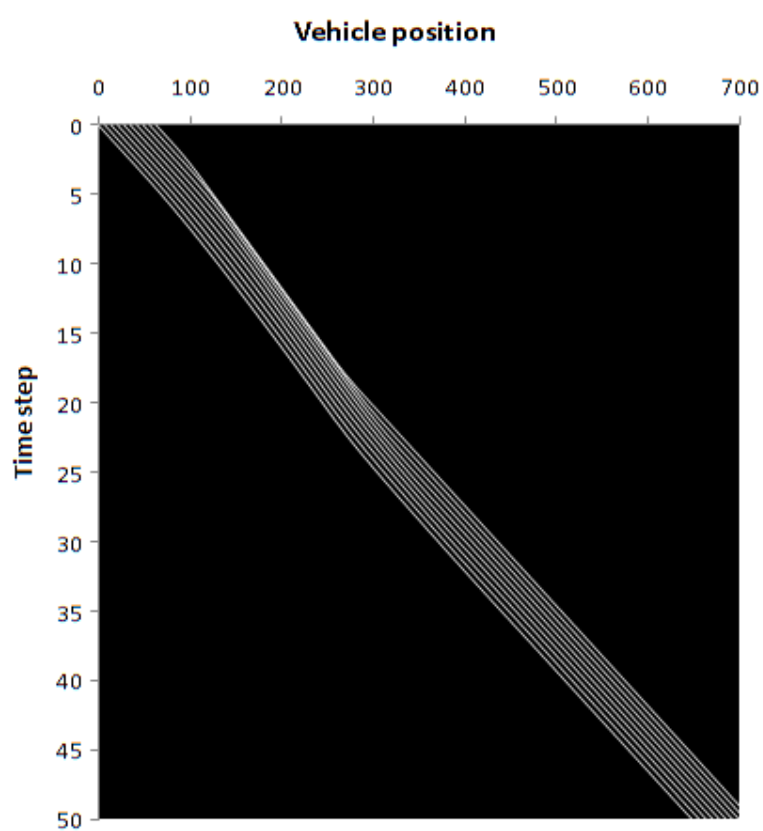


図 5.20: モデル 3 の時空図

ETC ゲートを通過する時間を短くできることが分かった．そして，隊列が長い場合でも，台数増加による通過所要時間の増加が他のモデルよりも少ないことが分かった．

第6章 結論

本論文では、隊列走行する車両車両の速度制御をモデル化し、このモデルを用いて高速道路、ETC ゲート、交差点でシミュレーションを行いその有効性を検証した。速度制御モデルとしては、Chandler モデルとそれを多台参照追従モデルに拡張したものを利用した。

第2章では、交通流解析のために提案されたモデルとその特徴について述べた。交通流解析において利用されるシミュレーションモデルはマクロモデルとミクロモデルに大別される。マクロモデルは1950年代から開発されており、計算コストが低いという利点があり当時の速度の遅いコンピュータでもシミュレーションを行うことができた。だが、交通流を流体モデルとしてシミュレーションしている為、個々の車両の挙動の違いによる効果などを考慮できない欠点がある一方、ミクロモデルでは、個々の車両挙動をモデル化し、それらの相互作用として交通流を表現する。個々の車両の挙動をモデル化するので、車両の特性や運転者の特徴などを表現することが可能で、個々の車両特性が交通渋滞などに与える影響を評価するのに適している。ミクロモデルにはセル・オートマトンモデル、車両追従モデルなどがある。セル・オートマトンを利用し交通流解析を行うモデルはルール184-CAモデル、NaSchモデル、確率速度モデル等がある。車両追従モデルについて、本研究では直前方車両1台のみを参照する車両追従モデルと、前方の複数台の車両を参照する多台参照追従モデルの2つにわけて説明した。

第3章では、セルオートマトンモデルを用いて、高速道路のETCゲート付近の交通流シミュレーションを行った。料金所の種類やETC車両の割合を変えてシミュレーションを行い、料金所の違いによる交通量の違いを考察した。その結果、交通量は、ETC車両の密度と料金所の種類に大きく依存すると分かった。ETC車両の割合が低い場合は、ETCの料金所を設置すると、一般車両が充満してETC料金所のある道路にも入ってしまい、その結果、車線変更を余儀なくされ渋滞を引き起こしてしまう。ETC料金所の代わりに両用料金所を1つ設けても、渋滞は解決できなかった。また、ETC車両の割合が高い場合は、ETC料金所でも両用料金所でもそれほど結果に差は無かったが、ETC車両の割合が高いほど2つの車線に料金所の区別を設けると、交通量は逆に減少していく様子が見られた。以上よ

り、交通量を高い状態で維持するためには、ETC 車両の割合や車両の密度に注目しながら料金所の種類を定める必要があるということがわかった。

第3章の結果より、高速道路の料金所では ETC ゲートを設置することで通常の停車する料金所よりも交通容量をかなり大きくできることがわかった。しかし、速度低下を強いられることからある程度の交通容量の低下がみられることもわかった。ところで、ETC ゲートを通過する交通のもっとも基本的な道路形態は、速度低下なしに列をなして ETC ゲートを通過する交通と考えられる。これは、複数の車両が連なって走行する隊列走行にほかならない。そこで第4章では、多台参照追従モデルを利用して効率的な隊列走行を実現することを考えた。最初に、モデルについて安定性解析を行い、参照する前方車両の台数を増やせば交通流がより安定することを理論的に確認した。つづいて、10 台の車両が連続して走行する交通シミュレーションを行った。その結果、参照車両台数が大きいほど、後続する追従車両は早い段階で速度制御を始めるので、交通流を安定して制御できることがわかった。

第4章の結果を踏まえて、第5章では、ETC ゲートで速度低下する場合において、効果的な交通制御について検討した。5 台の車両が隊列走行する場合において、先頭車両を除く追従車両が、自分より前方にある車両をすべて参照すると考え、参照される車両（参照車両）に対する運転者の反応度の合計を参照車両群に対する反応度と定義した。そして、隊列の先頭車両と各車両の直前方車両だけを参照すれば、この反応度を最大化できることを確認した。そこで、このモデルを元に車両の速度制御アルゴリズムを構築した。シミュレーションによって、直前車両だけを参照するモデルや前方2台を参照するモデルに比べて、提案した制御モデルは提案したモデルのほうが ETC ゲートを通過する時間を短くできることが分かった。そして、隊列が長い場合でも、台数増加による通過所要時間の増加が他のモデルよりも少ないことが分かった。

最後に本研究の今後の展望について述べる。

本研究では提案したモデルの有効性を検討するため高速道路、ETC ゲートでの交通シミュレーションを行った。今後は、これを市街地モデルなど、さらに入り込んだ複雑な道路ネットワークに適用することが望まれる。本研究で用いたセル・オートマトンモデルでは確率速度モデルを用いている。このモデルは、都市交通など複雑な道路ネットワークのシミュレーションを目的に開発されている。今回提案した車両速度の制御モデルをセルオートマトンモデルと組み合わせ、都市部の交通シミュレーションを行うことは非常にやりがいのある仕事と思われる。

また、提案した速度制御アルゴリズムを実車の制御に適用することも非常に重要なこと

と思われる。しかし、そのためには、高度道路情報システム (ITS) との連携が必須となる。そこで、それに先だって、小型移動ロボット群等を用いた実車のシミュレーションを通して、問題点を明らかにしておく必要があるだろう。そうして得た知識を実車両制御に適用すれば、ITS 技術の発展に寄与できると考えている。

謝辞

本論文の作成にあたって多大なるご支援とご指導を頂きました名古屋大学情報科学研究科 北栄輔助教授に心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。学生生活並びに研究の遂行にあたって終始ご指導とご支援を頂きましたことに感謝の念に堪えません。

本論文を作成するにあたり、副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたり貴重な御指導御助言を頂きました名古屋大学情報科学研究科 畔上秀幸教授、大岡昌博教授、に深く感謝いたします。

また、名古屋大学情報科学研究科複雑系科学専攻創発システム論講座 北研究室の皆様には、本研究の遂行にあたり多大なご協力を頂き、ここに厚くお礼申し上げます。

平成 24 年 1 月

名古屋大学情報科学研究科

清水 光輝

参考文献

- [1] TRL Software - TRANSYT. <http://www.trlsoftware.co.uk/products/detail.asp?aid=4&c=2&pid=66>.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Phenomenological study of dynamical model of traffic flow. *Journal of Physics I France*, Vol. 5, pp. 1389–1399, 1995.
- [3] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, Vol. 51, No. 2, pp. 1035–1042, 1995.
- [4] S. Bexelius. An extended model for car-following. *Transportation Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 13–21, 1968.
- [5] R. L. Bierley. Investigation of an intervehicle spacing display. *Highway Research Record*, No. 25, pp. 58–75, 1963.
- [6] R. E. Chandler, R. Herman, and E. W. Montroll. Traffic dynamics ; studies in car-following. *Operations Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 165–184, 1958.
- [7] Leslie C. Edie. Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. *Operations Research*, Vol. 9, pp. 66–76, 1961.
- [8] A. Galstyan and K. Lerman. A stochastic model of platoon formation in traffic flow. In *In Proceedings of the TASK workshop, Santa Fe, NM*, 2001.
- [9] D. C. Gazis, R. Herman, and R. B. Potts. Car following theory of steady state traffic flow. *Operations Research*, Vol. 7, pp. 499–505, 1959.
- [10] K. Hasebe, A. Nakayama, and Y. Sugiyama. Exact traveling cluster solutions of differential equations with delay for a traffic flow model. In D. Helbing, H. J. Herrmann,

- M. Schreckenberg, and D. E. Wolf, editors, *Traffic and Granular Flow'99 – Social, Traffic and Granular Dynamics*, pp. 413–418. Springer Verlag, 1999.
- [11] R Herman and R Rothery. Microscopic and macroscopic aspects of single lane traffic flow. *Operations Research, Japan*, Vol. 6, pp. 74–93, 1962.
- [12] S. P. Hoogendoorn and S. Ossen. Empirical analysis of two-leader car-following behavior. *European journal of transport and infrastructure research*, Vol. 6, No. 3, pp. 1567–7141, 2006.
- [13] Yi Jiang, Shuo Li, and Daniel E. Shamo. A platoon-based traffic signal timing algorithm for major-minor intersection types. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 40, No. 7, pp. 543 – 562, 2006.
- [14] H. Lenz, C.K. Wagner, and R. Sollacher. Multi-anticipative car-following model. *The European Physical Journal B*, Vol. 7, No. 2, pp. 331–335, 1999.
- [15] McTrans. TSIS-CORSIM. <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>.
- [16] K. Nagel and M. Schreckenberg. Cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics I france*, Vol. 2, pp. 2221–2229, 1992.
- [17] G. F. Newell. Nonlinear effects in the dynamics of car following. *Operations Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 209–229, 1961.
- [18] K. Nishinari and M. Hayashi (editors). Traffic statistics in tomei express way. *The Mathematical Society of Traffic Flow*, 1999. (The Mathematical Society of Traffic Flow, Japan, 1999).
- [19] Manabu Omae, Takeki Ogitsu, Noritsugu Honma, and Keisuke Usami. Automatic driving control for passing through intersection without stopping. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol. 8, pp. 201–210, 2010. 10.1007/s13177-010-0016-7.
- [20] H. Shimizu, A. Hara, T. Tamaki, and E. Kita. Simulation of traffic flow through toll gate. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, Vol. 14, , 2007.

- [21] H. Shimizu, S. Nishiyama, Y. Wakita, and E. Kita. Effectiveness of information from vehicles beyond nearest vehicle ahead for traffic flow. *ISRN Civil Engineering*, 2011. (in press).
- [22] Yuki Sugiyama. Optimal velocity model for traffic flow. *Computer Physics Communications*, pp. 399–401, 1999.
- [23] T. Tamaki and E. Kita. Urban city traffic simulation based on stochastic velocity model. In *Proceedings of The Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, pp. 215–216. Civil-Comp Press, 2005.
- [24] T. Tamaki, S. Yasue, and E. Kita. Traffic flow simulation using cellular automata. In *Proceedings of Civil and Structural Engineering Computing*. Civil-Comp Press, 2003. CD-ROM.
- [25] T. Tamaki, S. Yasue, and E. Kita. City traffic simulation using cellular automata with stochastic velocity model. In *Proceedings of The 2004 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA2004)*, Vol. 12, pp. 440–441, 2004. CD-ROM.
- [26] Transport Simulation Systems. Aimsun. <http://www.aimsun.com/>.
- [27] Y. Wakita, T. Iguchi, H. Shimizu, T. Tamaki, and E. Kita. Cellular automata simulation of traffic jams at the merging point of roads. In B. H. V. Topping and Y. Tsompanakis, editors, *Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, Stirlingshire, United Kingdom, 2009. Civil-Comp Press. paper35.
- [28] Y. Wakita, T. Iguchi, H. Shimizu, T. Tamaki, and E. Kita. Cellular automata simulation of traffic jams at the merging point of roads. In B. H. V. Topping and Y. Tsompanakis, editors, *Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*. Civil-Comp Press, 2009. paper35.

- [29] Y. Wakita, T. Iguchi, H. Shimizu, T. Tamaki, and E. Kita. Comparison of zipper and non-zipper merging patterns near merging point of roads. *International Journal of Natural Computing Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 19–29, 2010.
- [30] S. Wolfram. *Cellular Automata and Complexity*. Adison-Wesley Publishing Company, 1 edition, 1994.
- [31] アイ・トランスポート・ラボ. 街路網交通流シミュレーションモデル AVENUE.
- [32] 宇陀正志, 森津秀夫. 小規模道路網を対象とした交通シミュレーションモデル. 第19回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 69–72, 1999.
- [33] 越正毅. 交通工学通論. 技術書院, 第1版, 1989.
- [34] 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋. セルオートマトン法–複雑系の自己組織化と超並列処理. 森北出版(株), 第1版, 1998.
- [35] (株)アイ・トランスポート・ラボ. SOUND/4U.
- [36] 玉城龍洋, 安江里佳, 北英輔. 確率速度モデルとCA法による交通シミュレーション. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 3, pp. 858–869, 2004.
- [37] 桑原雅夫, 吉井稔雄, 森田綽之, 岡村寛明. 広域ネットワーク交通流シミュレーションモデル SOUND の開発. 生産研究, Vol. 48, No. 10, pp. 49–52, 1996.
- [38] 王継恩, 板倉直明, 本多中二. 非衝突条件を用いた追従運転データ特性の考察. 日本シミュレーション学会論文集, Vol. 25, No. 4, pp. 53–60, 2006.
- [39] 国土交通省. 国土交通省国土交通省道路局 ITS.
- [40] 社団法人交通工学研究会. やさしい交通シミュレーション. 丸善, 第1版, 2003.
- [41] 省エネルギー走行技術特別委員会. 高速道路料金自動収受システムの省エネルギー効果の試算.
- [42] 森下信. セルオートマトン複雑系の具象化. 養賢堂, 第1版, 2003.
- [43] 杉山雄規. 交通流研究の動向. 応用数理, Vol. 12, No. 3, pp. 64–73, 2002.
- [44] 杉山雄規. 交通流の物理. ながれ, Vol. 22, pp. 95–108, 2003.

- [45] 西成活裕. 超離散法とセルオートマトン、および粉体の離散モデルについて. 粉体工学雑誌, Vol. 37, No. 7, pp. 540–550, 2000.
- [46] 西成活裕. 超離散法とセルオートマトンおよび粉体の離散モデルについて. 粉体工学会誌, Vol. 37, No. 7, pp. 46–56, 2000.
- [47] 猪飼國夫, 佐藤章. 微視的道路交通シミュレーションのためのオブジェクト指向道路モデルの構築とその検証. 日本シミュレーション学会論文集, Vol. 18, No. 3, pp. 206–215, 1999.
- [48] 湯川諭. 計算物理学および統計力学的手法を用いた一次元交通流の研究-交通渋滞の統計力学-. 物性研究, Vol. 65, No. 1, pp. 117–170, 1995.
- [49] 吉村忍, 西川紘史, 守安智. 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発. 日本シミュレーション学会論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 58–67, 2002.
- [50] 馬場美也子, 北岡広宣, 棚橋巖. GA を用いた経路最適化による広域交通流シミュレータ上での交通状況再現手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3794–3800, 2002.
- [51] 馬場美也子, 北岡広宣, 棚橋巖. 交通流シミュレータ NETSTREAM の大型車対応. 情報処理学会, 高度交通システム研究会, 第 11-29 巻, pp. 211–216, 2002.
- [52] 豊田中央研究所. NETSTREAM.
- [53] 北村隆一. 交通工学. オーム社, 第 1 版, 2008.
- [54] 堀口良太, 永田尚人. シミュレーションを用いた料金所 ETC 化による容量改善の検討. 第 23 回日本道路会議・一般論文集 (A)・ITS 部会, 第 23 巻, pp. 314–315, 1999.
- [55] 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. 名古屋大学大学院人間情報学研究科 修士論文, 2003.
- [56] 堀口良太, 桑原雅夫. ETC ゲートが設置された料金所の容量に関する理論的解法. 土木計画学研究・講演集, 第 22 巻, pp. 603–606, 1999.
- [57] 堀口良太, 桑原雅夫. ETC 導入による料金所容量への影響に関する理論的解法と考察. 土木学会論文集, No. 653/IV-48, pp. 29–38, 2000.

- [58] 西山翔, 清水光輝, 脇田佑希子, 北栄輔. Chandler タイプの多台参照追従モデルの安定性解析. 日本計算数理工学論文集, Vol. 11, , 2011. (印刷中).