

東京大学システム創成学科

数理社会デザインコース

卒業論文

マルチエージェント交通流モデルによる
合流挙動のシミュレーション

Multi-agent traffic simulation of vehicle behavior at a merging section

指導教員: 文屋 信太郎 講師

2009 年 2 月 24 日提出

学籍番号 070921

大島 義弘

目次

第1章 序論.....	5
第2章 背景.....	7
2.1 交通と交通工学.....	7
2.1.1 交通.....	7
2.1.2 交通工学.....	8
2.1.3 交通工学の発展.....	10
2.2 道路交通の現状.....	12
2.2.1 交通が満たすべき条件.....	12
2.2.2 交通問題と解決策.....	13
2.3 交通流.....	14
2.3.1 交通流とは.....	14
2.3.2 交通流の性質.....	15
2.3.2.1 メタ安定.....	15
2.3.2.2 渋滞の原因.....	16
2.3.2.3 走行車線走行割合の逆転現象.....	19
2.4 交通流シミュレーション.....	20
2.4.1 交通流シミュレータが果たす役割.....	20
2.4.2 既存のシミュレーションモデル.....	21
2.4.2.1 マクロモデル.....	22

2.4.2.2	マイクロモデル.....	22
2.4.2.3	中間モデル.....	22
2.4.3	これからの交通流シミュレータ.....	23
2.5	既往研究.....	27
2.6	目的.....	29
第3章	手法.....	32
3.1	交通現象の捉え方.....	32
3.1.1	従来のシミュレータによる交通現象の捉え方.....	32
3.1.2	本研究における交通現象の捉え方.....	34
3.2	知的マルチエージェント.....	35
3.3	仮想道路環境	37
3.3.1	仮想道路環境の役割.....	37
3.3.2	仮想走行レーン	38
3.4	協調行動.....	40
3.4.1	マルチエージェントにおける協調行動.....	40
3.4.2	交通流シミュレーションにおける協調行動.....	41
3.4.3	協調グラフとその導入方法	41
3.5	最適速度モデル.....	43
3.5.1	基礎方程式	43
3.5.2	最適速度関数.....	44
3.5.3	結合写像型最適速度モデル	46
3.5.4	2車線系での車線変更モデル	47

3.6 車両の発生.....	48
3.7 新しいモデルの提案.....	49
第4章 数値実験.....	50
4.1 対象領域.....	50
4.2 結果.....	51
4.3 考察.....	54
第5章 結論.....	57
参考文献.....	58
謝辞.....	61

第 1 章 序論

1885 年、ドイツの技術者 C. ベンツは、ガソリンエンジンを搭載した世界初の三輪自動車を発明した。しかしベンツの果たした功績は単に技術的なものに留まらない。ベンツは世界初の自動車販売店を作り、以って自動車製造を産業とすることに成功したのだ。そして 1907 年、H. フォードは自動車の大量生産方式を確立し、それまでは富裕層だけのものであった自動車の大衆化に成功した。それからおよそ 100 年の月日の間、数多の自動車会社が誕生し、彼らは、ある一面ではエンジンの最高出力や最高速度など自動車の絶対的な性能を向上させることに心血を注ぎ、又他方では、生産方式を改良することで低価格化や品質の向上に努めた。これによって、自動車の大衆化は益々進むことになった。

しかし自動車の高性能化・大衆化は、同時に渋滞との闘いの始まりでもあった。自動車の普及率が増えるに連れて、自動車の交通量も増えていったが、肝心の道路の改良が交通量の増加に追いつかなかったために、世界各地で交通集中による渋滞が発生した。これは日本に於いても同様であり、特に首都圏は世界一の人口を擁する都市圏であることもあって、通勤時間帯になると随所で渋滞が発生する。

渋滞の抜本的な解消には、道路の改良が不可欠である。道路の改良とは、例えば信号機の形態の変更、交差点の形態の変更、車線の増加、新たな規制の導入などである。しかしこれらの解決策には、どれも多大な人的コストや時間的コストがかかる。よって、実際にどれだけの渋滞解消効果があるか分からないまま道路の改良がなされる、ということは現実的に有り得ない話である。

その渋滞解消効果がどのくらいあるのかを見積もるのに有効な手段として、古くから

シミュレーションの手法が用いられてきた。これは、現実の人間の行動やモノの動きをモデル化することで現象を再現し、以ってある条件下に於いてどのような現象が起こるのかを調べる手法である。古典的な社会シミュレーションでは、技術者が己の手と頭で数値計算を行っていたが、そのためにはモデル化の過程で大幅な単純化が必要であったため、計算結果の信頼性が低かった。現在では、計算性能が進化したコンピュータを使うことで、より信頼に足るシミュレーションが可能になっている。しかし、幾ら計算性能の良いコンピュータを用いてシミュレートしても、そもそものモデル化が現実を忠実に表したものでないと、信頼性の高い計算結果は得られない。コンピュータが発達した現代に於いても尚、モデル化は社会シミュレーションの重要なプロセスなのである。交通流シミュレーションに於いても同様に、自動車の挙動に関する信頼に足るモデルが開発されてこそ、より正しく渋滞解消効果を見積もることが出来るのである。

本研究では、渋滞の主なボトルネックの 1 つである合流部に焦点を当て、合流部で実際に発生している現象のモデル化について考察する。

第2章 背景

2.1 交通と交通工学

2.1.1 交通

人々は社会あるいは地域において、生活、生産および余暇に関連したさまざまな活動をおこなっている。この多様な活動を根底から支え、円滑化し、発展させるものとして人と人との交流、財貨(物、金銭)の移動・交換および情報の伝達がある。人、財貨、情報は社会の流通媒体であり、それらが空間の制約を克服して移動することによって社会や地域の活動は活性化し維持されるが、こうした事象を「交通」という[1]。

しかし思想や情報の移動は一般に通信として区別され、狭義の交通とは人と物の移動として捉えられる。ここで重要なことは、交通には人間の意志が介在しているということである。単に水が流れるとか、風が吹くような物理現象を交通と呼ぶことはない。衣・食・住に加えて、交通は日常生活の基本的な要件であるが、他の三つと異なり、交通そのものが目的となる事はない。つまり、交通とはある目的を達成するための手段であり、このことから、交通は派生需要と呼ばれる。

交通を構成する要素として、対象つまり移動の主体、交通手段、交通路、運転者の四つがあり、交通の4要素と称される[2]。移動を行うからには、人の何らかの意図を伴うことは明確であり、その意図のもとに移動する主体として、人と物がある。交通手段は交通のためのツールであり、動力を有するものを通常、交通機関という。交通路とは交通具を移動させるための線状空間もしくは施設であり、通路または路線と中継施設がある。通路・移動空間として、道路、鉄道線路、運河などがあり、中継施設は交通結節点、

あるいはターミナル施設とも称される。駐車場、駅、空港などである。また、その移動主体に意図を持って移動させる運転者が存在する。これらの4 要素の視点から、さまざまな交通の側面を具体化することができる。また、この他にも、以下のように分類することもできる[3]。

- 移動の空間的範囲における分類

交通による空間的移動範囲はさまざまあるが、まずは国際交通と国内交通に大別される。その上で後者は、都市と都市を結ぶ都市間交通、地方や都市内を対象とする地方交通や都市交通、都市を細分した地区内の地区交通に分類できる。

- 交通機能による分類

交通はその移動範囲の中で、四方八方様々な方向へ流れるが、この流れに強弱がある。このとき、強い流れで構成される根幹的な交通を幹線交通といい、それ以外を非幹線交通という。

- 交通手段による分類

交通はその通路空間をどこに求めるかにより、陸路、空路および水路があり、それぞれに適した交通手段が発達している。この交通手段に応じて、たとえば自動車、鉄道、航空機、船舶等に分類することができる。

2.1.2 交通工学

交通工学の起源は、1926 年、ハーバード大学に初めて道路交通専攻科が設置されたことまで遡る。1930 年には、アメリカの交通工学会 (Institute of Traffic Engineers) が設立された。その定義によれば、交通工学(traffic engineering)とは、

「人および財の安全、便利かつ経済的な流動と関連して、道路、街路およびそれに接する土地の計画と幾何学的設計ならびその上の交通の運営を併せて取り扱う工学」とされる。これは、どちらかといえば自動車への強い依存を背景とした定義であるといえる。日本語の「交通工学」はこの Traffic Engineering の訳語として生まれたが、それについては「道路交通工学」などと呼ぶ方がその内容をより正確に表している。

しかし、Traffic Engineering の定義がなされた後、時代が進むにつれ、道路交通の問題の改善や解決を図る場合、道路交通の範囲を越えて各種交通手段が適度なバランスをとる必要が出てきた。こうした事情から、アメリカの交通工学会は、1978 年に従来の名称を Institute of Transportation Engineering と変更し、Transportation Engineering の定義を、「安全性、迅速性、快適性、利便性、経済性を満たし、かつ環境と両立できる人と財の移動を実現するための、あらゆる交通機関の施設の計画、機能設計、管理運用に対する技術的、科学的原理の適用」とし、道路交通のみならず鉄道、航空、水運、パイプライン輸送などを含めた広範な交通を扱うこととした。一方、Traffic Engineering については、「道路、街路、高速道路、それらのネットワーク、ターミナル、および隣接する土地の計画、幾何学的設計、交通運用並びに他交通機関との関係を取り扱う Transportation Engineering の一面である」と改められたが、これは、Transportation Engineering の主として土木工学、統計学、力学といったハード的側面からのアプローチということである。Transportation Engineering にはもう 1 つ、Traffic Planning という領域があり、これはソフト的な側面をもつ社会科学、経済学、システム工学的なアプローチである。しかしながら、Traffic Engineering と Traffic Planing の間には明確な境界線が存在するわけではない。

一方、我が国においては、「交通工学」はソフト的側面からの交通計画に対するハード

的側面からの Traffic Engineering としての意味で受け取られることもあるし、ソフトとハードの両面からの Transportation Engineering としての総合的な交通工学の意味で用いられることもある。このように、我が国に於ける「交通工学」の意味は現在のところ極めて曖昧な形になっているが、本研究では少なくとも道路を利用する交通機関を対象とするものに限定して話を進めてゆく。

2.1.3 交通工学の発展

本節では交通工学の発展について述べる。初期の 1930 年代には、単路部や交差点といった特定部分に関する交通容量の決定方法と、交通現象の記述方法について力が注がれた。道路上の交通流現象を観測し、その法則性を見出すといった、経験的積み重ねにより、道路の端路部、交差点等についての交通容量の決定要因や、各要因の影響度合いが次第に明らかにされてきた。1950 年代に入ると理論的な研究が始められ、流体力学モデルや追従理論の出現で、交通容量が理論的に求める画期的な手法が形成され、現在でも交通工学の基礎理論の 1 つとなっている。更に、確率統計理論の発展の影響もあって、道路上の交通現象がかなり現実的に取り扱えるようになってきた。

こうした交通容量の研究は、主として道路の特定部分の計画設計と運用管理を目的に進められてきたものであるが、交通は移動するものであり、ある特定部分の交通問題が解消されても、その影響が他の場所に移転し、新たな問題を生じることが考えられる。このためにはネットワークとして、道路網全体の交通現象を取り扱うことが必要となった。

交通信号に関して、最初は道路交通の安全を確保する目的で設置されていたが、交

通量が増大するにつれ、交通制御としての機能が増していった。交差点交通を効率的に処理するための信号セッティングの研究は 1950 年の後半ごろから始まり、単独信号制御の考え方から、系統制御へと発展していった。さらには、面的な信号制御へと発展している。

1970 年代になると、ネットワーク交通流の理論として、交通量配分手法が確立され、局地的な交通現象の解明だけではなく、ネットワークにおける交通現象の記述に大きく貢献した。また同じ時期に、交通需要推定法の理論的發展として、交通需要の段階的推定法、デロイト法、フレータ法、機会モデル等の OD 交通量推定法などが提案されている。交通需要推定法の方法論は、このように初めは経験則に基づいたモデルから出発し、続いて因果関係を考慮したシステムモデルへと発展していった。

一方では、集合体としての交通行動を平均値で取り扱う従来の集計モデルに対して、新しく個別の交通行動を記述する非集計モデルが急速に発展した。最近では、こうした方法論に加えて、動的アプローチが盛んになってきている。

以上のように、実際に起こった現象の蓄積を基に経験則で交通行動のごく一部分のみを、主にマクロな定式化により表し、交通を記述しようとしてきたが、このやり方には自ずから限界があり、交通を分析する方法論は経験則モデルから因果律モデルへ、単独モデルからシステムモデルへ、マクロモデルからマイクロモデルへと発展してきた。しかし、現在においても交通行動の全体像を明確に捉えることは非常に難しい。原因と結果が簡単には割り切れないし、設計・計画段階から将来のことを正確に予測することは非常に困難となっている。物理現象を対象にした工学と交通工学とは、この部分が決定的に異なる。

2.2 道路交通の現状

2.2.1 交通が満たすべき条件

交通は日常生活において必要不可欠なものであり、その施設整備は利用者のニーズを考慮し、機能的かつ効率的に、しかも環境との調和をはかりながら進めていかなければならない。このとき、交通サービスが満たすべき条件として以下のものが考えられている[2]。

- 迅速性 : 交通時間の短縮に直接寄与する。経済の発展と生活の高度化に伴って交通移動の迅速性に対する要求はより高くなる。
- 安全性 : スピードが速くても危険では、一般に供する交通手段としては利用価値がない。人および財が、事故や損傷なく安全に輸送されなければならない。
- 経済性 : 交通費用が高い場合は、運賃負担に耐えられる特定の人や財の利用に限られる。これでは社会・経済に対する交通の役割を十分に果たすことができない。交通は時間距離と共に費用距離の短縮が重要である。昨今では、エネルギー節約を図ることも社会的使命となっている。
- 正確性 : 交通の所要時間が不正確では、種々の不都合をもたらす。移動速度の短縮がなされても、正確な運行が行われなときは、その分ロスタイムを見込まなければならないので、効果が減殺される。
- 随意性 : 交通は必要なときに、どこへでも行けることが理想である。現実はこのことを満たすことは困難であるが、交通利便のよい都市ではある程度満足させてくれる。モータリゼーションの進展は、個人の意思のおもむくままに交通が行えることが大きな要因となっている。

- 公平性 :どのような人や財に対しても、交通サービスは公平であることが望まれる。運賃による差別、地域的なサービスの偏りはできるだけ避けなければならない。老人、身障者、貧困者等にも適切な方法で交通サービスをすることを考えなければならない。

2.2.2 交通問題と解決策

交通は社会現象を反映した複雑現象であり、どのような状態を交通問題と捉えるか明確に定義することは難しい。しかし一般的には、交通問題とは、前項で述べた交通サービスの条件のうち、少なくとも1つが満たされない状態が恒常的、広域的に発生する場合である、として良いだろう。

それらの中で、最も典型的な交通問題が渋滞である。国土交通省の試算によると、渋滞による経済損失は全国で年間12兆円、国民1人あたりでは9万円にもものぼるといわれている。

交通問題の対策には次の方法が考えられる。

第1の方法は、何も対策を講じないことである。交通問題が悪化してもそのまま放置しておけば、各交通主体が該当地域を迂回するなどの対策を自発的にとることで、それなりの状態に落ち着くことがある。最も消極的な方法であるが、1つの選択肢であり、他の方策との比較検討を行う価値はある。

第2の方法は、問題の原因を究明し、関係する施設(ハード)を改善することである。例えば都心部の渋滞が問題になっている場合に、その近くに新しい道路を建設する方法である。一見単純な解決策に見えるが、現実に進めるのは容易ではない。金銭的・時間的なコストがかかりすぎるのである。特に国土面積が狭い我が国の場合、土地

の価格は諸外国と比べて非常に高いということが大きなネックになる。

また、第3の方法として、信号制御等によるソフト的な方策が考えられる。この方法は第2のハード的な方策と異なり、コストがあまりかからないため、比較的に実行しやすい方策である。しかし、信号制御が交通に与える影響は大きいと考えられるので、十分効果を分析する必要がある。

一般に交通問題を解決するには、第1の何もしない方法か、第2・第3の方法を組み合わせる方法がとられる。そして、これに組み合わせるべき第4の方法が、情報の利用である。道路標識、電光掲示板、ラジオやテレビを用いて情報を提供することで、交通主体に出発時間や交通手段、目的地の変更を促す方法である。提供する情報の種類・質とその効果を定量的に把握するのは難しいが、今後の情報化時代に向けて検討していくことは重要である。

2.3 交通流

2.3.1 交通流とは

交通流は、道路を走行する自動車の集団を流れの一種として捉える概念である[4]。

交通流を空気や水などの流体と比較すると、幾つかの重大な差異が見られる。

第一に、流れを構成する粒子の振る舞いが異なる。空気や水などの流体の粒子たる分子は、自らの意思を持たずに受動的に動く。また、粒子同士の衝突が許され、十分希薄な場合は粒子自身の排除体積効果は無視できる。一方で、交通流を構成する個々の粒子たる車は、運転手の心理に基づいて自発的に動き、車同士は衝突を避ける。また、時には数十キロメートルの車の列が渋滞を形成する場合もあるので、車一台の排

除体積効果は無視できない。

第二に、系を構成する粒子数が異なる。希薄でない空気や水の分子数は 10^{23} 個以上のオーダーであるが、道路上の車の台数はおおよそ 10^5 台以下のオーダーである。そのため、空気や水には統計力学が適用されるが、車の集団にはまだ完全には適用されていない。ゆえに、空気や水などの流体は統計力学から出発してボルツマン方程式からナビエ・ストークス方程式へと基礎方程式が確立されているが、交通流の運動を完全に記述する基礎方程式は確立されていない。

2.3.2 交通流の性質

上述のように支配方程式が確立されていない現在において、交通流現象を的確に捉えるためのアプローチとして実際の交通流を観測することは極めて有効である。現在までに見出された交通流の一般的な性質を以下に列挙する。

2.3.2.1 メタ安定

交通流の観測には、ある地点を感知器と呼ばれる機械を用いて一定時間測定する方法が一般的に行われている。よく用いられる物理量としては、ある地点を一定時間あたりに通過する車の台数を表す(交通)流量、一定時間あたりに通過する車の平均速度、及び一定距離に存在する自動車の台数を表す(交通)密度などが挙げられる。道路がこれらの物理量の関係をプロットしたものは、基本図と呼ばれている。

図 1 に実際の交通データをもとに描いた基本図の一例を示す。図中の縦軸は 5 分間あたりの交通流量であり、横軸は 1[km]あたりの交通密度である。密度の低い部分では流量と密度はほぼ線形の間隔を保っていて、車が渋滞せずによく流れていることを

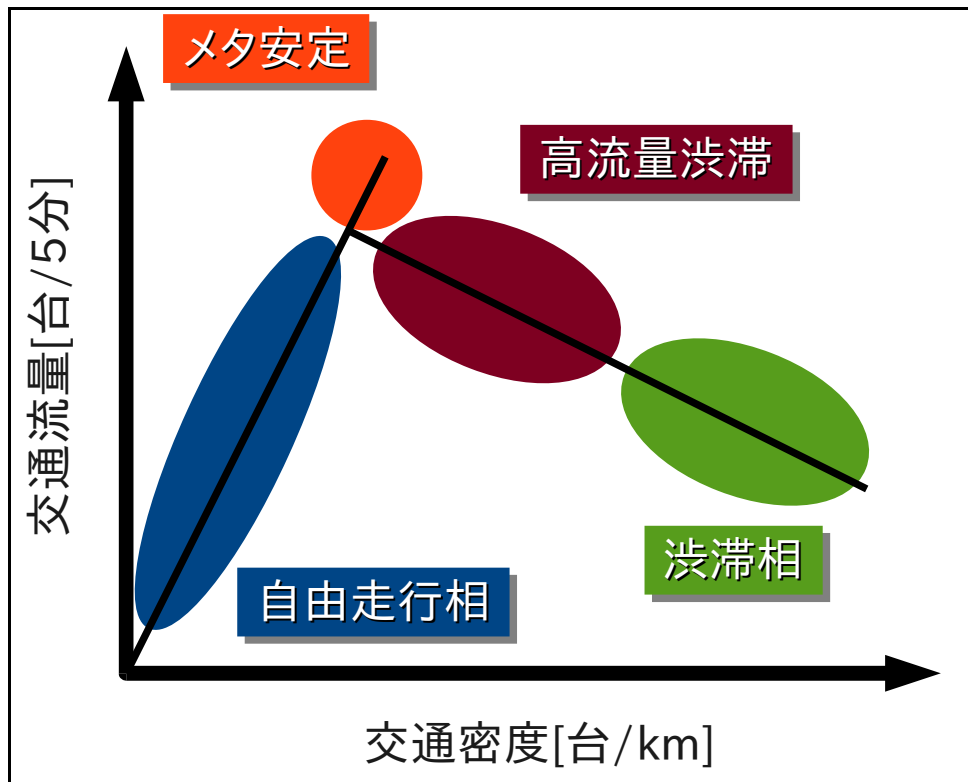


図 1:基本図の概念図

示している。この部分は自由走行相と呼ばれる。一方で、ある程度の密度を超えると、流量と密度の関係ががらりと変化している。すなわち、流れが相転移しており、この密度は臨界密度と呼ばれる。この相転移領域で流量が最も大きい部分はメタ安定と呼ばれ、流量の低い部分は高流量渋滞と呼ばれる。メタ安定は持続時間は短く、寿命は10分間程度である。更に密度が増えると、流量が減少していく。この部分は渋滞相と呼ばれる。基本図の形状が図1のように漢字の人型であること、すなわちメタ安定と相転移領域が存在することは、交通流に見られる一般的な性質の一つである。

2.3.2.2 渋滞の原因

日常生活において頻繁に体験される渋滞は、一意には定義されていないが、道路の

種別によって表 1、表 2 のように定められている。

渋滞は、その原因によって大きく 2 つに分けられる。

第 1 の渋滞は道路集中渋滞と呼ばれるものであり、道路の構造的な特性によって発生する。具体的な自然渋滞の発生箇所としては、下り坂から上り坂へと緩やかに変化するサグ部や、トンネルの入口部、インターチェンジ合流部及び料金所などが挙げられる。サグ部では、緩やかな上り坂に気づかずにわずかに速度を落とす車両がいると、後続車は車間距離が縮まるため連鎖反応的に減速する。トンネルの入口部では、視界の変化及び圧迫感によって減速する車両がいると、やはり後続車が連鎖反応的に減速する。合流部や料金所では、通過できる車の流量が周囲の道路より小さいため、車が詰まりやすい。

第 2 の渋滞は、突発渋滞と呼ばれるものであり、交通事故、工事規制及び車両故障などが原因となって一時的に形成される渋滞である。

実際に発生した渋滞を種別毎に分類すると、例えば東日本高速道路では図 2 の通りであり、突発渋滞よりも自然渋滞の発生数が多いことがわかる。又、自然渋滞の原因を道路の構造別に分類すると、図 3 の通りであり、サグ部での渋滞の発生が多く、次いで合流部での発生が多いことが分かる。料金所での自然渋滞は ETC(ノンストップ自動料金支払いシステム)の普及に伴い、2002 年から 2007 年までの 5 年間で発生数が 9 割減少した。

表 1:各高速道路会社による渋滞の定義

東日本高速道路など	40[km/h]以下で 1[km]の車列の延長が 15[min]以上継続
首都高速道路	20[km/h]以下
阪神高速道路	概ね 30[km/h]以下

表 2:財団法人日本道路交通情報センターによる渋滞の定義

郊外部の高速自動車国道等	40[km/h]以下
都市部の高速自動車国道等	20[km/h]以下
その他の道路	10[km/h]以下

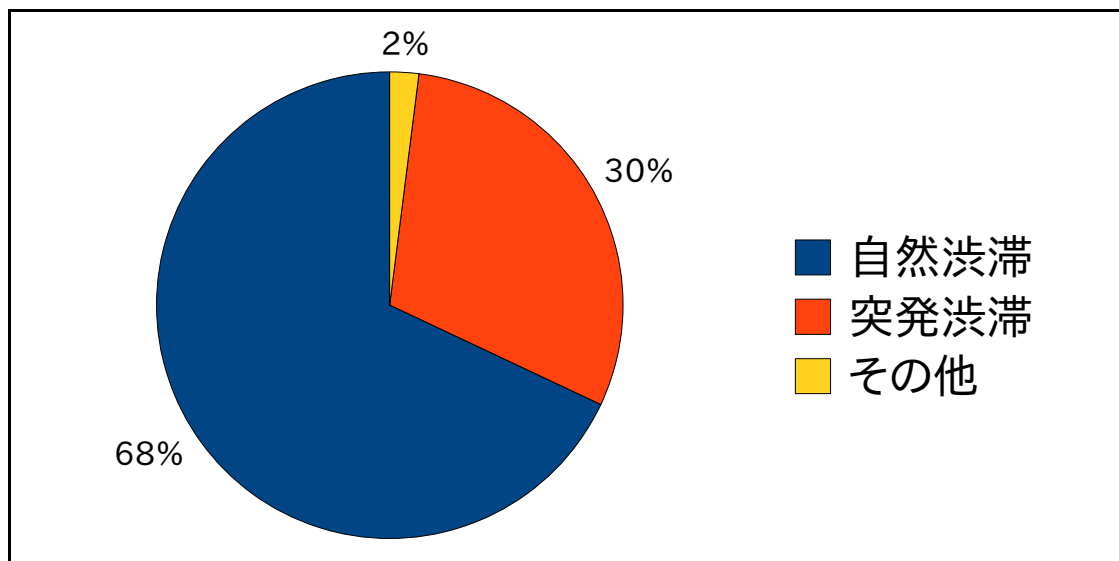


図 2:渋滞の種類と割合(2007 年、東日本高速道路)

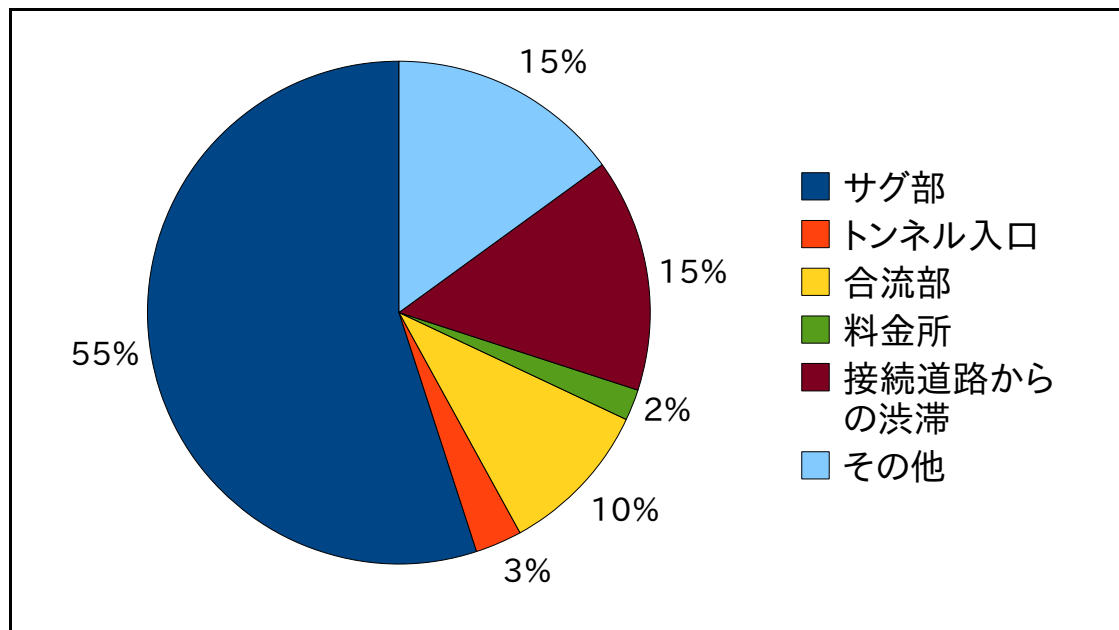


図 3:自然渋滞の原因(2007 年、東日本高速道路)

2.3.2.3 走行車線走行割合の逆転現象

走行車線と追越車線のある 2 車線道路において、交通密度が低い場合は走行車線を走る自動車の割合が大きいですが、交通密度が大きくなると追越車線を走る自動車の割合が大きくなる。この占有率の逆転現象も、交通流に見られる一般的な性質の 1 つである。占有率の逆転現象が起こるメカニズムは、以下のように考えられている [5]。まず、流れが自由走行相である場合は、走行車線上を走行する車両のほうが追越車線上を走行する車両よりも多い。道路が混み始めて前方車との車間距離が縮まってくると、走行車線上の車両は、空いている追越車線へと進路変更し始める。道路の混み具合がひどくなるにつれて、追越車線へと車線変更する車両が増加するため、ついには追越車線の占有率が走行車線の占有率よりも大きくなる。その後、さらに道路が混むと、追越車線から走行車線へと戻ることが困難となるため、追越車線の占有率が走行車線の占有率を上回ったまま、両車線の占有率はほぼ等しい値に落ち着く。

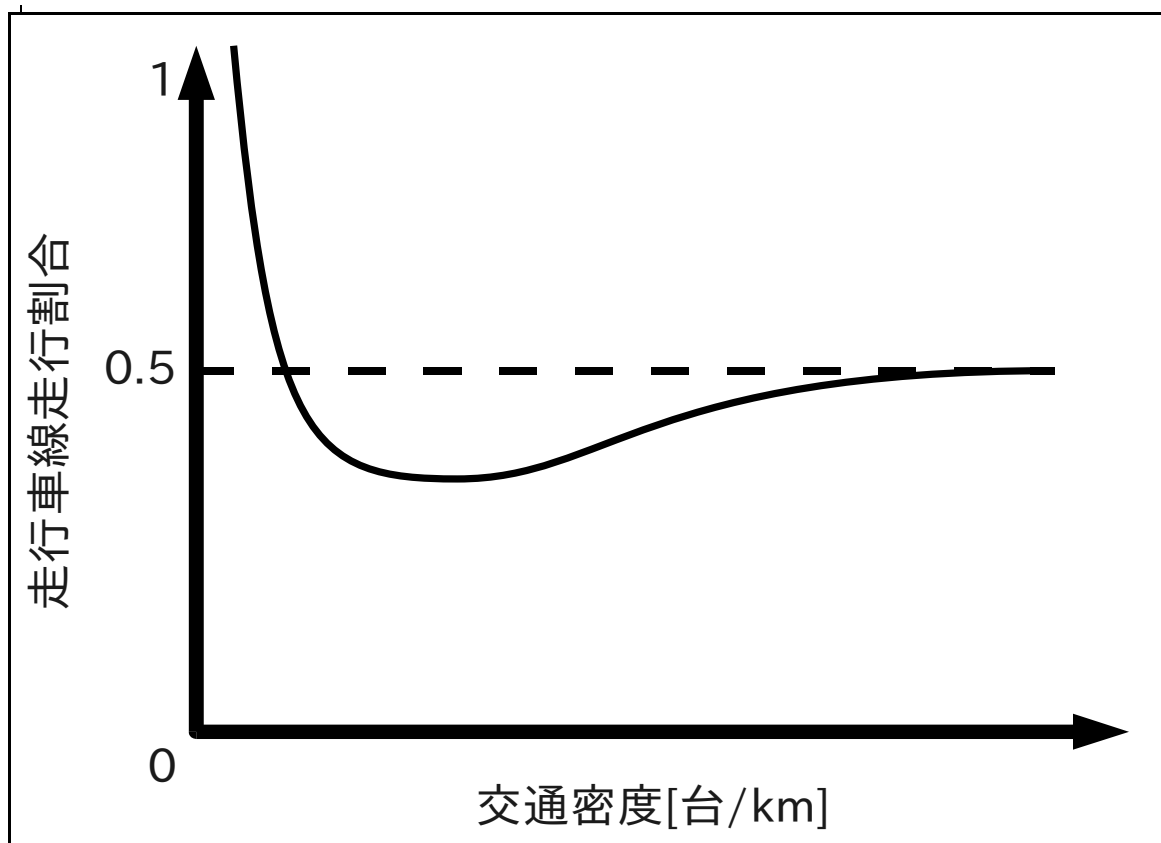


図 4:交通密度と走行車線走行割合の概念図

2.4 交通流シミュレーション

2.4.1 交通流シミュレータが果たす役割

道路交通流シミュレータの開発は 1960 年代に盛んになった。日本では 1973 年にシミュレーション技術研究会で当時の交通流シミュレーションについて特集された。その後、交通渋滞の激化と共に、動的な交通配分やボトルネック交通現象研究が主要課題となるにつれ、最近再びまた新しい交通シミュレータの開発が盛んになっている。これは、問題が変化したことによってシミュレーションに求められるものも変化しているということである。しかしその本質は変わっておらず、現実の交通システムが複雑で大規模なものであること、交通システムの構成要素には非決定論的なものが含まれている

ことから、分析にはシミュレーションが大きな力を発揮すると期待されている。

交通の分野に限らず、計算機シミュレーションがその力を発揮するのは、まず施策運用のための試算である。一般的な理論式による試算は、その一般性ゆえに多くの場合に用いられるものであるが、制限も多い。静的であり問題非依存性の強い理論式に対し、それでは汲み取れない部分を補完するツールが交通流シミュレータである。

動的なシミュレーションが持っている大きな利点として、分かりやすさが挙げられる。交通の専門家が用いるマクロな指標を用いるためには、その正確な意味を汲み取ることが必要であるし、またその成立ちや本質を理解するのは簡単なことではない。それに対しシミュレーションに入力するデータは現実から得られる直接的な値であることが多く、本質的には何らかの解釈を行った後のマクロ量である必要はない。出力に関しても、近年におけるデータ可視化の技術やデータマイニング分野の技術、また計算機の持つ再現性などのおかげで、知識の有無に関わらず一定の情報を得ることが可能である。従来の試算で得ていたマクロな指標は、より直接的な出力結果から算出することが可能であり、上位互換性を持つともいえる。このように実用的な交通流シミュレータには、大きな社会的需要があると考えられる。

2.4.2 既存のシミュレーションモデル

交通流シミュレータは車両のモデル化手法によって、大きく2つのカテゴリに分類することができる。交通を流体のような単純なモデルとなぞらえて管理する方法がマクロモデル、個別の車両の挙動について詳細に取り扱うものがマイクロモデルである。

以下にその特徴と著名なシミュレータを挙げる。

2.4.2.1 マクロモデル

マクロモデルを用いたシミュレータの目的は、交通需要の大まかな流れを見ることと交通渋滞を的確に再現することにある。これにより、新たな道路の建設計画に対する事前評価が可能になる。以前の主流は Greenshields[6]、Greenberg[7]、Draw[8]らが導出した流体モデルを用いたマクロシミュレータであったが、最近では車両を離散的に扱うモデルも増えている。マクロモデルによるシミュレーションは一般に計算量が少なく、広域を対象にしたシミュレーションが可能である。

このカテゴリに含まれる著名なシミュレータには、1979 年に英国 Leeds 大学で発表された、流体モデルを用いたモデル SATURN[9][10]のほか、東京大学生産技術研究所で開発された、流体モデルと離散モデルを組み合わせた SOUND[11]モデルなどがある。

2.4.2.2 ミクロモデル

従来のミクロモデルの主な目的は、道路網のうちの局所的な部分の詳細な再現であった。自動車は離散的に扱われ、車線変更や追い越しなどの挙動が再現されるシミュレータもある。

著名なシミュレータには、米国連邦道路管理局が 1970 年代初頭に開発した TRAF-NETSIM[12][13]、カナダの Van Aerde と Yagar らによって開発された INTEGRATION[14]などが挙げられる。

2.4.2.3 中間モデル

最近では、目的を極端に分離することなく、対象をさほど限定しない中間モデルのよ

うなものが登場している。その典型例である AVENUE[15]は、過飽和状態を考慮したハイブリッドブロック密度法という手法で交通流を再現し、交通状況に応じた経路選択挙動のモデルを内包している。又これは、車両の位置を連続値で得ることはできないが、ある程度流動的な位置管理を行うことができるようになっている。

2.4.3 これからの交通流シミュレータ

現在の交通問題を解決し、また新たな交通問題の発生を防止するには、施策の事前評価が必要である。これは 2.2.2 節で述べたハード的解決方法、ソフト的解決方法、情報利用の全てに関して言えることであるが、特にその実現に時間とコストのかかるハード的解決方法については、その効果を慎重に見極めなければならない。

多くの工学分野において、この過程は実験という形で行われる。しかし交通工学においてはこのような実験を行うのは非常に難しい。交通現象は規模が大きく、実験規模が大きくなって莫大なコストがかかるからである。また、交通は生活に密着しているため、長期間にわたる実験というのも現実的ではない。

そこで、コンピュータシミュレーションを使って効果を実証することになる。ここでは、これまで述べてきた道路交通の現状と新たな動きを踏まえた上で、次世代の交通流シミュレータに求められる要件を幾つか挙げる。

交通情報の利用による効果が評価できる

先に述べた交通問題の解決策のうち、情報利用に関する新しい技術が ITS(Intelligent Transporting System)[16]である。ITS とは、情報利用だけではなく交通を智能化し、交通問題の解決を目指すシステムの総称であり、カーナビゲーション

ンシステムで用いられる VICS(道路交通情報通信システム)などが含まれる。

現在のシミュレータでは ITS の導入効果が評価できないだけでなく、既存の情報伝達手段による情報提供の効果も十分反映できているとはいいがたい。今後 ITS を広く浸透させていくためにも、情報利用の有無を取り扱えることは必要である。

動的な状態変化に応じた運転を再現できること

渋滞の延伸を再現できる事は最近のシミュレータに当然備わっているべき要件であるが、これに加え、運転そのものが動的なものである事をよく認識し、これを再現する必要がある。例えば、同じ渋滞でも全く動かない場合と、少しずつでも動いている場合では、ドライバーの心理状態はかなり違うだろうし、付随して運転行動も変化するであろう。

領域の汎用性

従来のシミュレータのように、マイクロモデルなら局所、マクロモデルなら広域、などというように明確な適用範囲を設定するのではなく、必要に応じて適切な範囲を設定する必要がある。ITS の評価には広域のネットワークを見て、渋滞の延伸を解析する必要があるが、その反面、非常に狭い領域の小さな現象が全体に影響を与える場合も多い。例えば、交差点の設計の問題を考えると、物理的な構造を決定する際には詳細なマイクロシミュレータで事足りるが、信号現示のタイミングを含めた計画になればマクロシミュレータが必要になる。一つの計画を評価するときに複数のシミュレータを用いなければならないのでは非効率である。従って既存のマイクロ・マクロシミュレータの両方の領域をカバーできる総合的かつ大規模なシミュレータの存在が望まれる。

動的な経路選択を反映すること

経路選択機能を内生化したシミュレータは数多いが、出発前に経路を設定するタイプがほとんどであり、動的な経路選択を行えるものは非常に少ない。既に現実の自動車は運転中であってもカーナビゲーションシステムが最新の情報を取得し、状況に応じて最適な経路を提示する。情報の有無を取り扱うシミュレータにはこの部分が不可欠である。

道路や自動車を詳細にモデル化できること

ミクロシミュレータの利点である、車両挙動の詳細な再現を継承する必要がある。なぜなら、路上駐車回避、路上駐車による全体への影響などを詳細に検討する必要があるからである。また、経路選択においても道路の形状が原因となってドライバーが迷走するといった事態も日常的に発生しており、これらの影響も無視できないし、道路の形状自体を経路選択の際の情報として利用するといった内部的な要因もある。また、単純な幾何学的形状だけではなく、道路種別や様々な交通規制を組み込める事が必要である。

車の多様性の確保

現在では確率・統計的な処理が行われている、大型車の影響、タクシーやバスなど自家用車とは異なる走行の全体への影響、そして何より、車両そのものの物理的特性の違いを表す必要がある。これらの車両の評価を行うと共に、ドライバーの特性を自然な形で扱う必要がある。

環境への影響の評価

交通問題の中の大きなものの一つとして、環境への悪影響があることは先に述べた。環境への影響を定量的に算定する事によって、政策決定の一助とすることができる。またこの部分は交通施策だけではなく自動車の保安基準などの施策も関わってくるため、多様性の再現とも大きく関係してくる。

高速性・規模の確保

ミクロ・マクロ両面の利点を生かすためには、計算負荷の増大は避けられない。これに対処するために、現在でも猛烈に発展している計算機科学の分野の知識を応用して、並列または分散計算環境上に展開する事を視野に入れる。

運用柔軟性・拡張性

本当に実用的であるためには、データの過不足に対応した結果を得ることが出来るような流動的な運用が不可欠になる。また、利用するデータは既存のものを扱えるならば、それが最も望ましい。地図データを手作業で打ち込んでいくのは非効率であるし、そこに電子データを用いることができるならば、無用な繁雑さを避けることができる。また、構想自体が流動的である ITS や、今後の交通政策に対応するために、機能の追加が比較的容易に行えるべきである。これらを実現するためには、複雑で洗練されたシステムを維持するための、計算機科学的な技術が不可欠である。

信頼しうる現実のデータとの整合(再現性)

現実をよく再現しないシミュレータを用いて将来の予測をすることはあり得ない。まずは現実と良くマッチするシミュレータを構築し、社会的な信用を得ることが必要である。

多様な交通主体・交通手段への対応

道路交通とは、自動車に限ったものではない。道路上には歩行者もいれば自転車もいる。また、前述のように路面電車が走ることもある。これらの交通主体、交通手段が自動車交通に影響を及ぼすのは明白である。例えば自動車が交差点を左折する場合を考えて欲しい。歩行者がいなければ自動車はためらわず、安全を確信して左折する。しかし歩行者を考慮に入れた場合、進行方向の横断歩道に歩行者がいいるかどうかを確認し、接触しそうであれば停車しなければならない。それによって渋滞が発生することもある。また路面電車を導入するためのシミュレーションを行うためには、少なくとも路面電車がシミュレータ上に登場しなければならない。行動原理の異なる主体が混在する道路空間を適切に表現する必要がある。

2.5 既往研究

既往研究として、東京大学の西による、織り込み部に於ける交通流のシミュレーションがある[4]。織り込み部とは、図 5 のように 2 本の道路が合体し、中央線間で相互に車線変更が行われ、後に再び 2 本の道路に分岐するような構造のことである。西のシミュレータはセルオートマトンモデルを採用している。セルオートマトンとは、セル状に区切られた離散的な空間上において、あるルールに従ってセルの織り成すパターンを離散的に時間発展させる数学モデルである。セルオートマトンモデルには、自動車の位置が離

散化されるのでコンピュータで扱いやすいという利点がある。又、西は車線変更のモデル化も行い、2.3 節で述べた交通流の性質を再現するような織り込み部のシミュレーションに成功している。

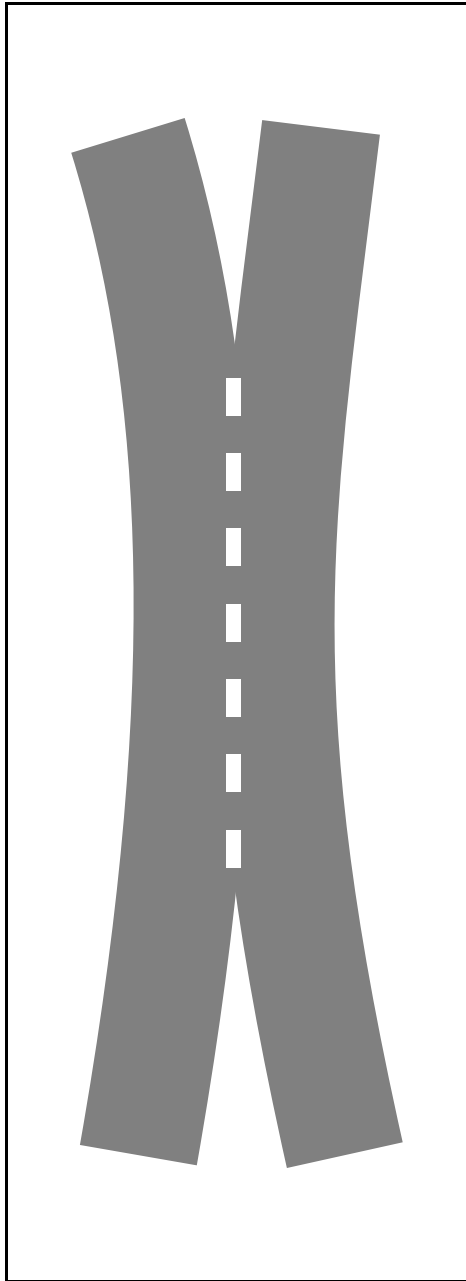


図 5:織り込み部の概念図

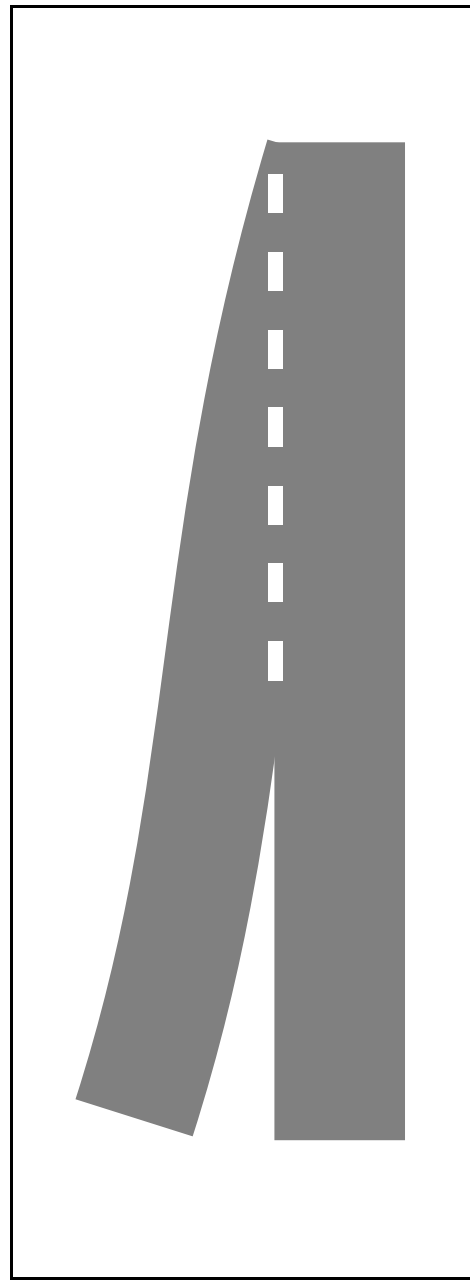


図 6:合流部の概念図

又、東京大学の関による、協調行動モデルを利用した知的マルチエージェント交通流

シミュレータを製作した研究もある[17]。この既往研究では、追従モデルの 1 つであり、現在も多くの研究者によって支持されている最適速度モデルを用い、車線の変更には協調行動のモデルを使うことで、合流部のシミュレーションを行った。

2.6 目的

本章のまとめとして、本研究の目的を述べる。

図 7・図 8 は、2000 年 11 月 2 日に首都高速道路都心環状線内回り神田橋入口から上流 310[m]の地点での交通量データを基に描いた基本図である。実際に観測された青色の点を観察すると、メタ安定が発現していることが分かる。。

関の研究では、合流部の下流において、交通流量や平均速度といったパラメータに対して、良好な再現性を得ることができる。しかし関のシミュレータを用いてシミュレーションを行い、ボトルネックとなる合流部の上流の地点に於ける基本図を描くと、図 7・図 8 の赤色の点のようになり、自由走行相での平均速度等については良好な再現結果を得られることができるが、メタ安定や渋滞相については発現されなかった。更に図 7 を観察すると、関のシミュレータでは実際と比べて交通流量が大幅に低下して再現されることが分かる。

又、最近の研究によって、合流部の上流では比較的長時間に亘って高流量渋滞が観察されることが分かった[5]。図 7・図 8 を観察すると、確かに実際の合流部上流では長時間の高流量渋滞の発生が確認できる。それに対し、関のシミュレータで再現された交通流では、走行車線においては長時間の高流量渋滞が確認できるが、追越車線においてはそれは確認できない。

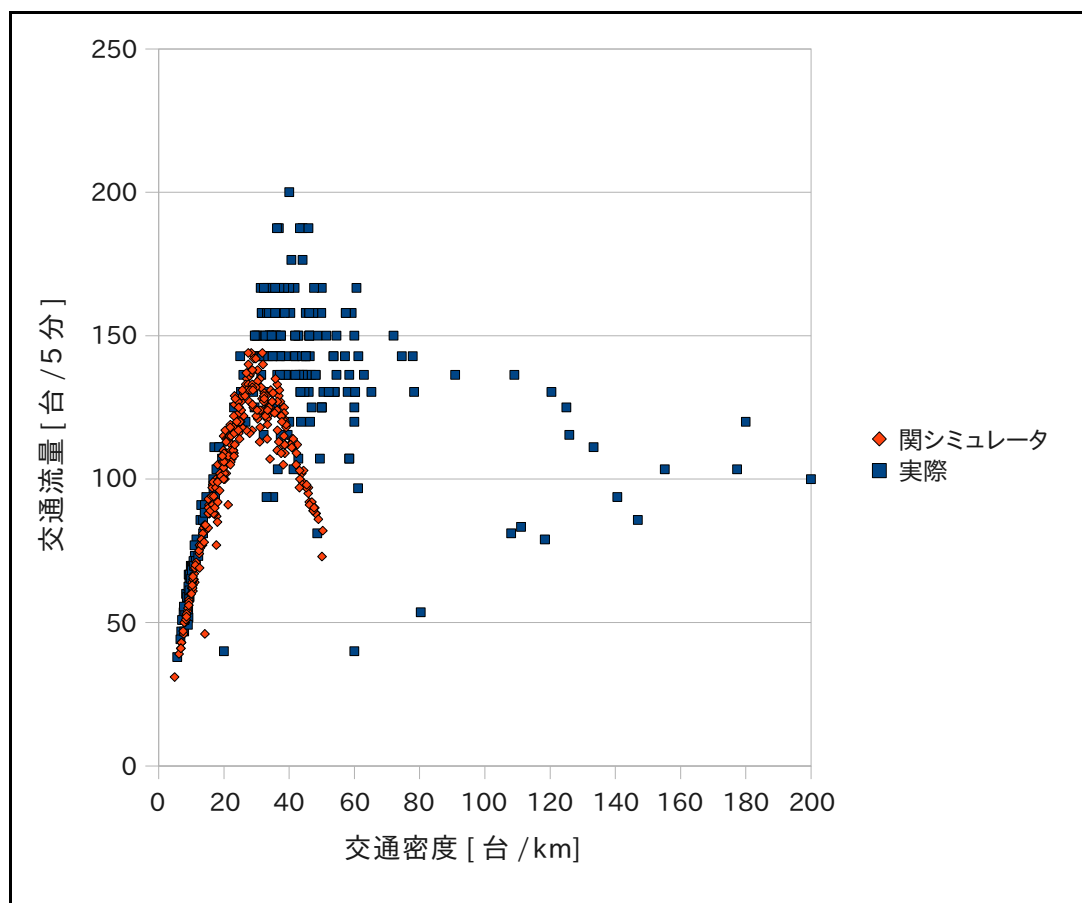


図 7: 神田橋入口合流部の上流 310[m]での走行車線の基本図

すると、西が採用したセルオートマトンモデルでは交通流の性質の再現に成功し、関が採用した追従モデルではそれに成功しなかったことになる。それでは、一般的にセルオートマトンモデルよりも追従モデルの方が優れているのかといえば、そうではない。追従モデルは、セルオートマトンモデルに比べ複雑な道路構造に柔軟に対応できるため、現実の道路ネットワークへの適用性が高い。そのため、追従モデルによって渋滞現象のより詳細な再現が可能になればより実用的である。本研究では、西のシミュレータで用いられたモデルを参考に関のシミュレータを改良し、追従モデルからのアプローチによって、より現実に近い現象を再現することを目的とする。

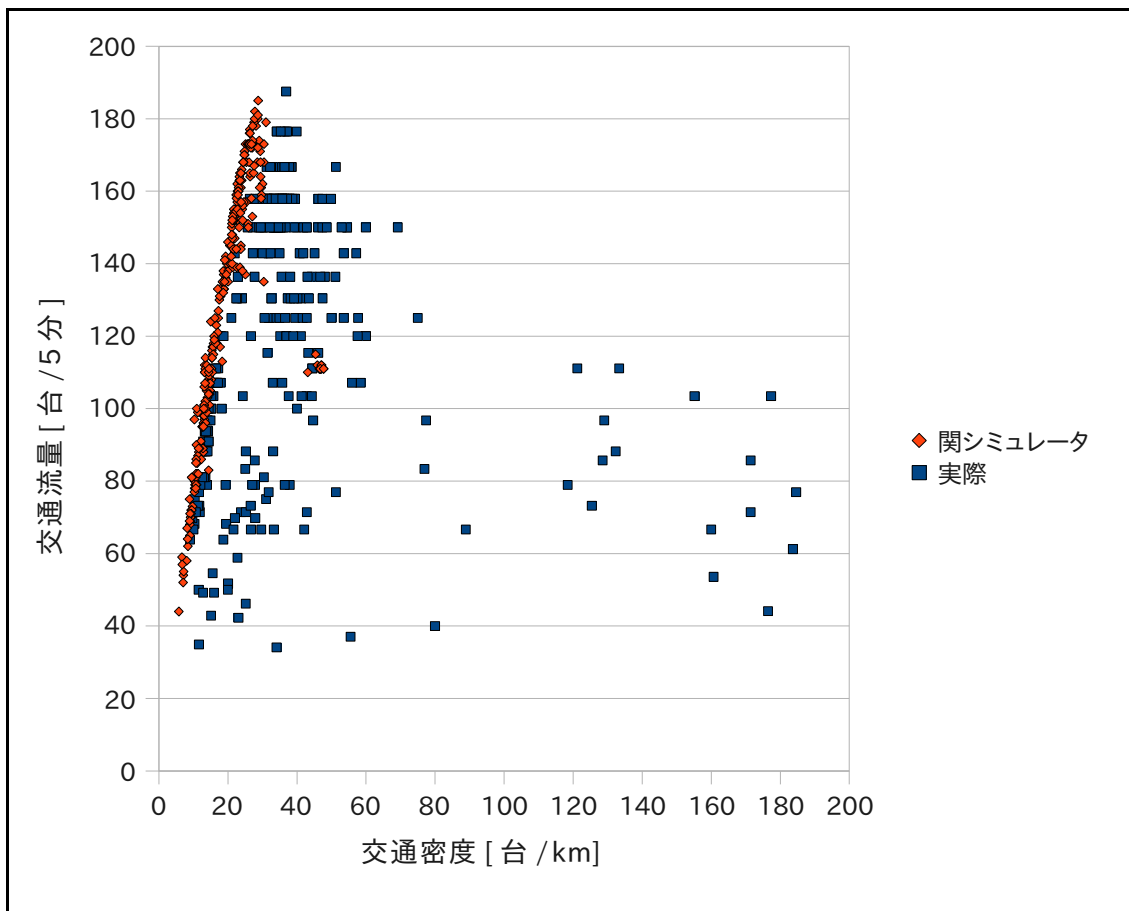


図 8:神田橋入口合流部上流の上流 310[m]における追越車線の基本図

第3章 手法

関が開発したシミュレータは、自動車の前進や車線の変更などの行動に対して、知的マルチエージェントモデルと協調行動モデルを採用したことが大きな特徴である。本章では、関が開発したシミュレータの概要と利点及び問題点について述べる。

3.1 交通現象の捉え方

3.1.1 従来のシミュレータによる交通現象の捉え方

交通流シミュレータにおける自動車の前進に関するモデルには流体モデル、待ち合わせモデル、追従モデルなど、多くの研究者によって様々な種類が提案されているが、それぞれに長所と短所がある。

既存のモデルによるシミュレータの最大の問題点は、解析の前提条件を明示していな

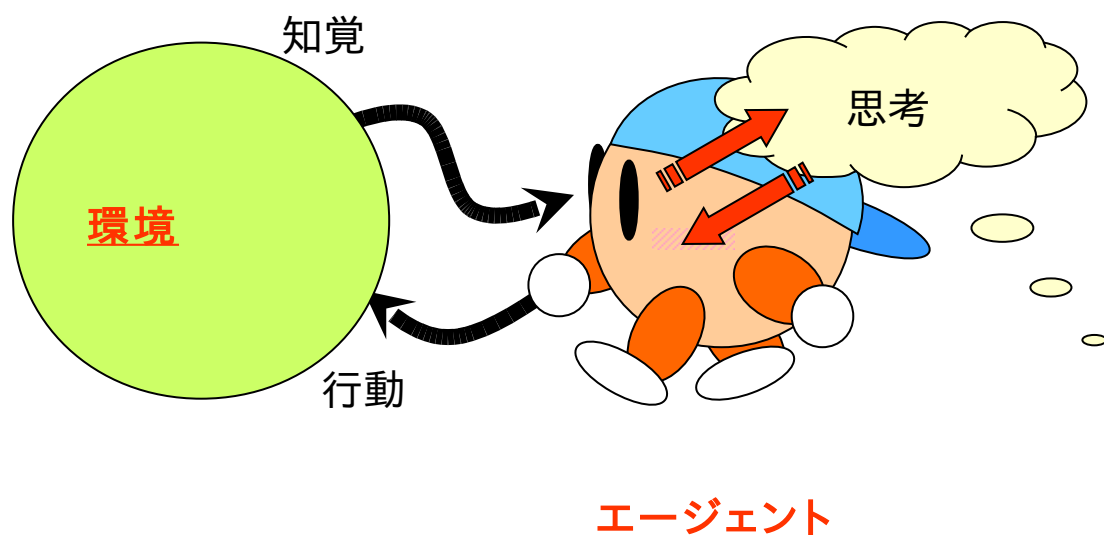


図 9:エージェントの概念図

い、または本来の前提条件を越える問題に対して適用されている、という点にあると考えられる。

例えば流体モデルの場合は、密度管理で交通流を表現できるための仮定が設けられている。多くの時間帯において定常流が期待され、信号などもほとんどない高速道路のような環境においてはよい再現性が期待できるが、それでもサービスエリアでの流入・流出などの多少複雑な現象が入って来た場合には、かなり複雑な理論や統計処理によるパラメータ推定などが必要になる。その他のモデルの場合においても、現実近づけるための仮想的な理論、パラメータ設定などが必要になる点については変わらない。

しかし流体モデルや確率論的モデルにおいて最も問題とされるのは、個々の車の動きを再現できない点である。換言すれば、これらは観測されるマクロな指標が従うルールを理論的に考察したものであり、シミュレーションによってその理論の裏付けをとることができる可能性はあっても、その理論の枠組を越えるものには適用できない。

また多くの車両離散表現モデルのシミュレータについて大前提として置かれているのは、交通主体の行動が合理的であるということである。実際には経験からも分かる通り交通行動は必ずしも合理的とは言えない。特に、合理的であるかという点に関していえば、この傾向は更に強まる。交通現象を物理現象との対比によって捉える方向性のモデル化には、この非論理性を考慮にいれたものが非常に少ない。

さらに多くのシミュレータに対して言えることに、車の多様性を本質的なものとして捉えていない点が挙げられる。確かに詳細な運転挙動についてのみ考えた場合は、さほど違っているように見受けられないかもしれないが、情報の取捨選択や経路の事前決定、また運転中の判断など運転者がその全貌を知り得ない状況での選択行動が、交

通状況に大きな影響を及ぼすことは日常的に起こり得る。こういった場合の行動の差異は統計的な処理で解決される場合もあるが、本来は行動主体がどのような情報を保持しているかという点に大きく影響されるであろう。

情報の保持という点で考えれば、車両はその台数の数だけ多様性を持つのが普通である。さらに運転行動以外の行為から、全体の状態を知り得るような情報を得ることもある。運転中のラジオでの交通情報などもそれにあたり、また近年では ITS による情報配信などが期待されている。これらの情報伝達に関する部分は、既存のシミュレータでは無視されがちな要素であるが、道路交通において大きな影響力を持つはずである。

上記のような既存のシミュレータの各特徴を一言でまとめるとすれば、交通現象に法則を見出して、決定論的にまたは確率的に扱おうとするものである。

3.1.2 本研究における交通現象の捉え方

交通現象をいわゆる交通工学の立場から捉える方法は非常に重要であるが、同じくらい重要なものとして社会的側面があるのではないか。そもそも交通需要が喚起されるのは社会的な現象であり、そこには単純な論理や法則では全体が把握できない複雑さがある。しかし我々は交通行動を起こす際に深い考察をすることは少ない。これは個人のレベルで考えた場合には交通行動を起こす理由は単純であるが、それが様々な違い理由で構成され、また大量に存在することによって、交通現象全体としては、非常に複雑な現象となっているということを意味する。本研究では、交通現象を「お互いに異なるが比較的単純なルールを持つ交通主体が多数集まることによって創発される現象」として捉えることにしている。創発とは、自動車同士がやりとりを行っている様を外

部から観察した際に、思いがけない新たな現象が発生したかのように見えることである。自動車(もう少し精確に言えば、自動車の運転者)自身は、2.3.2 節で述べた諸現象現象を起こそうとは考えておらず、結果として起こった諸現象に対して外部観察者が名前を与えているわけである。

3.2 知的マルチエージェント

複雑な現象を解析する手法の 1 つとして、知的マルチエージェント手法が挙げられる。本節では、この知的マルチエージェント手法について説明する。

ここで知的マルチエージェントと呼んでいるのは、言葉の定義を明確にするためであり、一般的にはマルチエージェントという言葉が用いられている。マルチエージェントやエージェントという言葉は、さまざまな分野でさまざまな意味を伴って用いられるため、本研究のシミュレーションモデルの中で用いられるマルチエージェントという意味で用いる場合は特に知的マルチエージェントという表現を用いる。知的マルチエージェントという言葉は、関が構築したシミュレータのシステム全体の構造がマルチエージェントのフレームワークに基づき、また車両の表現やその運転者に関しては知的エージェントの考え方をを用いていることからくる造語である。

エージェントとは、文献[18]によれば、「ある環境をセンサで知覚し、ある環境にエフェクタを通して動作するものである」と定義される。しかしこの定義は、人間が「知的でない」と感ずるようなエージェントでも満たすことができる。現在知覚できていないからと言って、それを本当に存在しないものであると扱ってしまうというのでは、確かに知的ではないだろう。

そこで、適応的に行動するエージェントを知的エージェントと定義する。適応的であるとは以下の3つの条件を満たすものを指す。

- 即応性: エージェントは、環境の変化に対して即座に反応した行動をとることができる。
- 目的指向性: エージェントが持つ目的に向かって、積極的な行動をとることができる。
- 社交性: エージェントは他のエージェントと通信を行うことができる。

これらは人工知能分野で用いられているものとほぼ同一のものであり、「行動主体(エージェント)がそれぞれ自律した判断を行い、それらがある環境に存在させた場合に、協調作業を行い、全体の現象として創発が起こることがある」ようなシステムのことを、知的マルチエージェントシステムと呼ぶことにしている。ここでは、システム全体として一つの目的を達成したり、その結果がより良いものであったりする必要はないという立場を取る。

道路交通問題においてあらわれる、道路の利用効率や車両平均速度などをマクロ量、交通需要や交通密度と車両速度の関係などをメゾ量、車間距離とその車両の速度・位置などをミクロ量とすれば、従来のシミュレータでは概してメゾ量によって方程式を構成するトップダウン的なアプローチを採っていた。これに対し、知的マルチエージェントを用いた手法では個々の車の間にあるルールなどから交通現象をボトムアップ的に記述する。実測値との比較が十分出来るような場合には、マクロ量に関してトップダウン的なアプローチが有効であることが多い。しかしここで注意したいのは、ボトムアップ的なアプローチを用いることによって、ミクロな挙動がマクロな現象へ影響していく過程を再現できるということである。知的マルチエージェント手法をとることにより、目的を持つ

たミクロな行動が、本来意図されていないはずのマクロな現象にどのような影響を及ぼすのか、そのマクロな現象がどのような特性を持つものか、知ることができる。

また交通行動は本質的に社会的なものであるから、経路の選択やそもそもの交通需要、個人の嗜好などの要素を考慮するためにも知的マルチエージェント手法を選択するメリットは充分にあると考えられる。

3.3 仮想道路環境

3.3.1 仮想道路環境の役割

現実の道路環境との区別を行う意味で、モデル化を行いコンピュータ上に再現された道路環境を仮想道路環境と呼ぶことにする。

シミュレーションにおいては、適用可能性を限定しないためにもその計算効率を初めから考えたモデル化を行うことが必要になる。これは交通流シミュレータにおいても例外ではなく、モデル化とデータ構造やアルゴリズム、そして計算効率は密接な関係を持つ。交通流シミュレータでは、他の知的マルチエージェント手法を利用したシミュレーションと異なり、エージェントの数が非常に多くなる。

逆に連続体のシミュレーションなどと比べると、再現すべき現象には多くの制約がかかっている。具体的には、自動車エージェントは車道上を走行するという仮定があり、2次元、または3次元空間全てを考慮する必要はないといえる。ただし、これ以上の制約を設けることは、シミュレータ構築の本来の意図に反することになる。これは、シミュレーションを行う上での定量性は確保する必要があるということである。又、仮想道路環境はあくまでエージェントが存在する環境であるから、エージェントからの視点で、他の

エージェントや道路がどう見えるか、ということに注意しなければならない。

又、エージェントが道路や他のエージェントを見ることを可能にするためには、環境が他のエージェントの速度や位置といった情報を保持するだけでなく、見るという行為の見返りとして適切な情報として提供する必要がある。本来であればエージェントは自身で環境が保持する情報を自律的に収集すべきであるが、個々のエージェントには知りうるべき情報と知りえない情報がある。環境は全ての情報を保持しているため、そのエージェントが知りうるべき情報であるのか判断する必要があるが生じるが、この判断はエージェントが自身で行うべきではない。そこでエージェント-エージェント間での情報のやり取り、また環境-エージェント間での情報のやり取りをプロトコルという形で定義した。

環境は、プロトコルに従ったエージェントからの要請をうけて、適切な情報を提供する、または適切な変化を起こす必要がある。例えば、自動車エージェントは各ステップにおいて標識の情報を得ようと環境に要請するが、このとき、そのエージェントから見える範囲内の標識であるかどうかを環境側で判断して、もし見える範囲内であれば提供する、というものである。仮想道路環境は情報を保持すると共に、プロトコルに従った返信を行う、計算機でいうサーバのような役割を果たすと考えるとよい。

以下では、環境がどのように情報を保持するかを中心に述べる。

3.3.2 仮想走行レーン

本研究のシミュレータでは、自動車の走行車線にはオブジェクト指向道路モデルを採用する。

オブジェクト指向道路モデルでは、全ての道路構造を仮想走行レーンという最小単位で表している。このモデルは、一般的には有向グラフと呼ばれる形の構造を持っている

る。道路をネットワークとして捉えた場合には、走行レーン毎に走行できる向きが決まっていることが普通である。そのため、単純に接続状態を記述するだけでは不完全であり、有向グラフと同じく、方向を持つことが必要である。

仮想走行レーンは自動車のモデル化と密接に関わった道路のモデル化である。運転の操作は

- 操舵とその結果の車線幅内の左右振れ及び、隣接車線への移動
- 加減速操作とその結果としての速度変化
- 灯火器及び音響による情報伝達

と分類できるが、その上で車線幅内の左右振れを簡略化し、操舵は道路のレーンに従って行われるものと仮定する。自動車の運転をするときには運転者は予定軌道を頭に描き、それに沿うように運転する。これは直観的には、線路を走る列車と似たモデルがある。

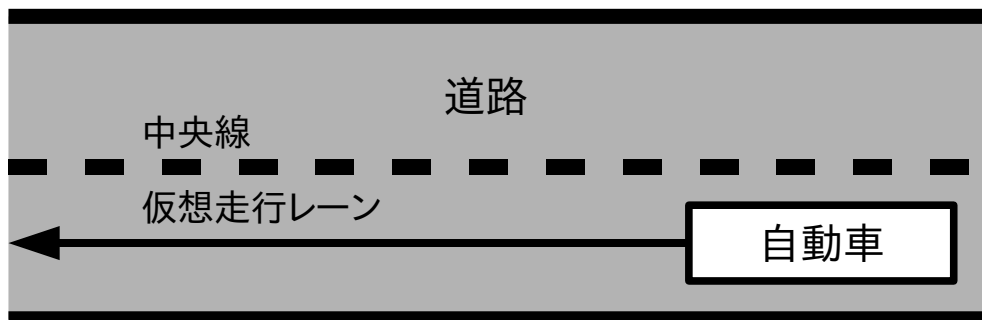


図 10:仮想走行レーン

仮想走行レーンには全体の長さや前後の仮想走行レーンとの接続情報、道路が持つ様々な付帯情報などを保持させ、これらを知的エージェントに対して提供する。仮想レーンを作成することにより、車の操舵の計算を省くと同時に、本来は 2 次元の連続値である車両の位置を、離散的な構造と 1 次元の連続値へと変換できる。

3.4 協調行動

3.4.1 マルチエージェントにおける協調行動

協調とは「互いに協力し合うこと。特に、利害や立場などの異なるものどうしが協力し合うこと」という定義がある。人間が器官系や動物といった他の生命をもつ主体と大きく異なる点は、制度や慣習といった人為的なルールの下で協調的な行動をとり、協調行動のためには自らの利己的な行動を律することができる能力に優れている点にある。人間が関わる行動やその分野において、協調行動というものは複数主体が相互に作用することで生まれるものであり、非常に重要な役割を担っているのである。

知的マルチエージェント環境において、協調行動の定義は大きく分けて 2 つある[19][20]。

- なんらかの活動で複数エージェントが、ある共通の目的のために、協力してエージェント個々の和以上の性能を出すこと。
- 個人の利益追求行動を制限し、集団での共通の利益保持を可能にすること。

前者は作業配分や競合解消といった動作によるもの、後者は自己利益犠牲や事故回避といった動作によるものである。これは、マルチエージェントが存在する環境、目的によって異なるためである。

エージェントは自律した主体として、自身が置かれている環境から受け取った情報をもとに、意思決定を行う存在である。あるエージェントの意思決定は、他のエージェントの意思決定に影響され、同時に他のエージェントの意思決定に影響を与える。独立した各エージェントの目的によって相互作用は形を変え、あるときには相互に同じ目標に向かって協調し、またあるときには相互に対立する目的のために競合する。すなわち、

各エージェントが自分の目的達成を目指すとき、そこには何らかの利害の対立や協力が生ずる。これがマルチエージェントの環境である。それゆえ、このような環境において、協調行動は非常に大きな意味を持っているといえる。

3.4.2 交通流シミュレーションにおける協調行動

交通における協調行動とは何であろうか。自動車同士の協調行動の具体例を挙げると以下の挙動がある。

- 合流部において合流する
- 交差点において直進車が右折車に道を譲る
- 車線変更時に割り込む
- 追い抜かれる際に車線変更する

これらの行為に共通して言えることは、「譲る」という行為をする自動車が存在し、自分の欲望を一時的に抑制しているということである。つまり、交通現象における協調行動の定義は、前述した2つの定義のうち、「個人の利益追求行動を制限し、集団での共通の利益保持を可能にすること」であるといえる。

3.4.3 協調グラフとその導入方法

関のシミュレータでは、RoboCup サッカーのシミュレーションにおける協調の手段の一つとして用いられている協調グラフ[27][28][29]を参考にし、交通分野に適応したモデルにすることでエージェント間の協調を図っている。

エージェント同士が協調行動を行う場合、近くにいる他のエージェントの小さな集合と協調しなければいけないことが多い。協調グラフにより、この小さな集合をエージェ

ント同士の局所的な線状のつながりに分解し、依存関係を引き出す。そして、そのつながりが協調行動において必要だと判断されたエージェントのみ、協調を考える。これにより、局所空間における協調を考えることができる。

交通流シミュレータにおけるエージェントに、協調グラフを導入する手順を以下に示す。

1. 協調行動が必要となる状況が発生する

車両が合流レーンに入ってきた時、車線変更の開始を知らせるためにウインカーを出した時はこれから協調が発生する合図となる。そのため、協調の中心となるのは、基点となる車、つまり合流する車や車線変更する車となる。

2. ある程度の範囲のエージェントそれぞれに役割を設定する

合流の場合では、合流する車・合流先レーンの前方の車・合流先レーンの後続車・合流車の後続車などがあり、それぞれの役割となるエージェントが存在する場合は、役割に当てはめる。

3. 役割を設定したエージェントそれぞれの状態を定義する

役割を設定した車両の位置、速度の情報を確認し、基点となる車との間隔、相対速度を求める。

4. 協調グラフの範囲を絞り、状況の場合分けする

車両の位置から、協調行動を行わないと考えられる車を依存関係から排除し、つながりを削除する。これにより協調グラフの範囲を、基点とする車を含めた数台に限定する。そして、協調グラフの範囲内にいるエージェントの位置によって、状況をいくつかの場合分けする。

5. エージェントの行動の種類を設定する

それぞれの車両が取りうる行動の種類を挙げる。車の動作は限られているので、通常走行・加速・減速・車線変更・停止の 5 種類とする。

6. エージェントの行動パターンごとの効用を定義する

場合分けをした状況において、各車両が取る行動のパターンに対して効用関数を与える。効用関数は、単純な数値だけでなく、車両間の距離や相対速度を考慮した関数を与えている。

7. 効用最大となる行動パターンを選択し、各エージェントが行動に移す

行動パターンの中から効用が最大値を取るパターンを選び出し、それぞれの車両がその行動を実行に移す。

上記の手順による協調行動の実行を 1 ステップごとに繰り返す。これにより、協調する範囲もステップごとに変化することが可能となっている。

3.5 最適速度モデル

3.5.1 基礎方程式

交通流シミュレーションにおける自動車の前進を再現するモデルは長年数多く研究されてきた。本研究では、1990 年代に坂東ら[26]によって提案された最適速度モデル (Optimal Velocity Model: 以下 OV モデル) を用いることにする。

基本的には一次元追従モデルであるが、車両の大きさは考えないで、運転手・車の性能もすべて同じとする。交通流を記述するために構成分子である車の運動が持つべき性質は、追従挙動と排除効果のみである。つまり、車は前方車頭距離が詰まると減速する、という内容である。この思想に簡単な数学的表現を与えたのが、次の基礎方程式

である。

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = \alpha \left[V_{opt}(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

ここで $x_n(t)$ は n 番目の車の位置、 Δx は前方の車との車頭距離である。また、 α は感応度(sensitivity)と呼ばれ、速度差に対してどれくらい鋭敏に応答するかを与える。車間によって運転を制御する情報として OV 関数 $V_{opt}(\Delta x)$ というものを導入した。

OV 関数は、前方車間に応じた最適速度(安全速度)を与えるもので、運転者が個々に高速道路での交通規範として持っているとする。この速度と実際の速度を比較して加速度を制御する。最適速度(optimal velocity)は、車間が小さければ小さく取るべきで、車間が大きければ速度は大きくて構わない。しかし、実際は速度制限や車の性能のため、いくらでも大きいわけではないので最高速度が存在するであろう。よって、その関数形は単調増加関数で、車間無限大で最大速度になる、 $V_{opt}(\Delta x_n) = V_{MAX}$ ($\Delta x_n \rightarrow \infty$) という形である。

このモデルの物理的位置付けは、排除効果(衝突回避)・相互作用の非対称性(追従挙動)・応答の非可逆性(散逸系)の性質より、「散逸的な非対称相互作用する排除的粒子流」といえる。OV モデルは、この最小モデルと考えられる。よって交通流に限らず、同様の基本的性格を持つと思われる他の対象にも広く適用可能であろう。

3.5.2 最適速度関数

OV 関数の選び方にはある程度の自由度があり、sigmoid な関数を想定する。実測と比較する場合の OV 関数は、実際の追従挙動の観測によって、その関数形とパラメータを定めることができる。

現実の運転の仕方を反映させるもので、簡単な関数として式(2)がある。

$$V_{opt}(\Delta x) = \tanh(\Delta x - c) + \tanh c \quad (2)$$

ここで c は定数である。

一般に最適速度は、車頭距離 Δx が単調増加で、無限に大きくなったとき最大速度に達するような関数である必要がある。この考えをもとに考えられたのが式(3)である[21]。

$$V_{opt}(\Delta x) = \frac{V_{MAX}}{2} \{ \tanh(\Delta x - x_c) + \tanh(x_c) \} \quad (3)$$

このとき、 v_{MAX} は車の最大速度であり、 x_c は安全距離である。

また、文献[22]により、高速道路とテストサーキットでの車間と速度の測定が行われており、高速道路における平均的な最適速度関数として、

$$V_{opt}(\Delta x) = \frac{V_{MAX}}{2} \left\{ \tanh \left(2 \frac{\Delta x - d}{w} \right) + c \right\} \quad (4)$$

というパラメータが得られている。本研究におけるシミュレーションが適用される実環境は高速道路であるため、この関数と値を採用することにする。ここで、 $v_{MAX}=22.2[\text{m/s}]$, $d=25.0[\text{m}]$, $w=23.3[\text{m}]$, $c=0.913$ である。図 11 に、この式での最適速度と車頭距離の相関を表す。実際のシミュレーションでは、最適速度が負の値をとったときは 0 となる。

α の値については、関は文献[23]を参考に $\alpha=2.0$ とおいた。

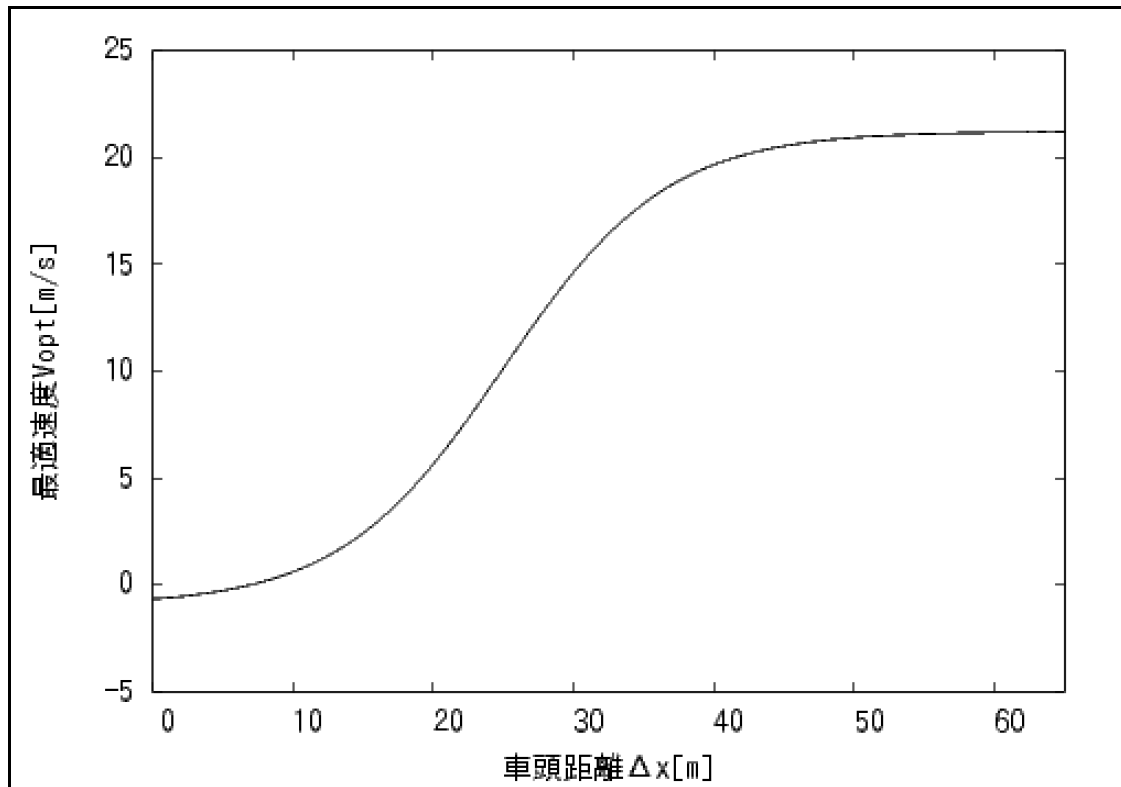


図 11:車頭距離と最適速度の相関

3.5.3 結合写像型最適速度モデル

最適速度モデル、式(1)を時間的に離散化し、それを基礎方程式とするモデルを結合写像型最適速度モデルと呼ぶ。以下では、この結合写像型最適速度モデルを考える。

各車両の位置 x と速度 v は、時間間隔 Δt ごとに次の規則で更新される[24]。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t) \Delta t \quad (5)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \alpha \{ V_{opt}(\Delta x(t)) - v(t) \} \Delta t \quad (6)$$

Δt は更新時間間隔であり、人間の交通現象への反応速度から 0.1[s]程度に設定する。

ここでの時間に関する離散化は、数値計算のためではないことを強調しておく。離散

化したモデルを採用することによって、流入と流出のある開放系や二車線系など車両並びを変更することや、急制動など微分方程式に馴染まない挙動を取り入れることが容易になる。特に車線変更は、車線変更への要求、安全性の確認、車線変更の実行の要素からなり、微分方程式で記述するのが困難であり、離散モデルが必要である。

3.5.4 2 車線系での車線変更モデル

1 車線上での車両の挙動に比べて、2 車線上での車両の挙動の理解は進んでいない。車線変更挙動そのものの実測に基づくモデル化も困難である。そこで、ここでは単純で無理のなさそうな車線変更規則をモデル化し、結合写像型最適速度モデルに組み込むことを考える。車線変更挙動は 2 つの部分に分けることが可能である。第 1 は、車線変更を必要とする状況の発生である。車両が先行車両によって、その希望速度での走行を妨げられ、車線変更を行った方が速く走行できる状況が発生する場合や、合流をしなければならない場合である。第 2 の要素は、その車線変更が安全に行えるという状況である。車線変更する先の車線に、安全に入ることができる空間があることが必要である。さらに、これらの 2 つの条件が満たされたからといって、必ず車線変更が実行されるわけではない。

一例として、走行車線から追越車線への移動を考える。

走行車線を速度 v で走行している車両を考える。速度 v_o で走る先行車両との車頭距離 Δx がある値 Δx_{safe} より小さい場合、その車両は車線変更をしたいと考えるとする。追越車線に入った場合の車頭距離 Δx_p のほうが Δx より大きければ、車線変更によってより高速で走行することができる。しかし、追越車線を走行する直後の車両との車頭距離が十分 ($\Delta x_p > D(v)$) でなければ安全に車線変更はできない。追越車線を走

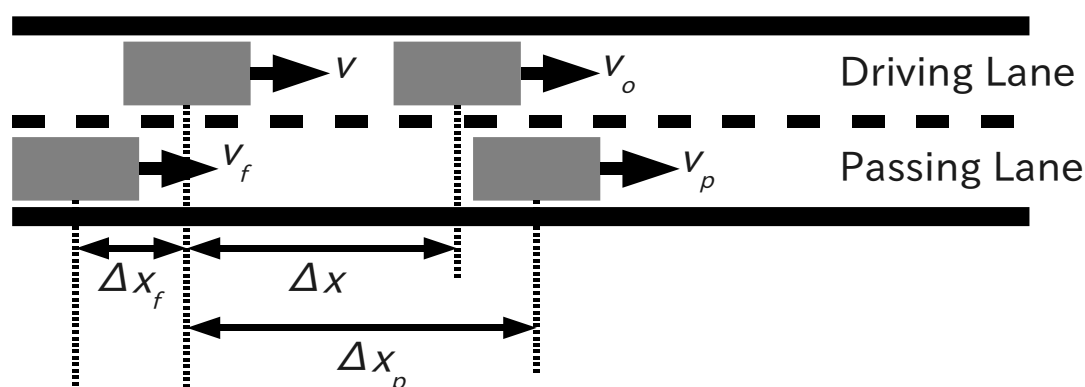


図 12:走行車線から追越車線への車線変更

行する直後の車両との十分な車頭距離として、関のシミュレーションでは、自車の速度 v に対応する安全距離として、

$$D(v) = d + w \left(\frac{v}{v_{MAX}} - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

を採用している。

関は、追越車線から走行車線への車線変更、合流挙動による合流車線から走行車線への車線変更の場合も式(7)とほぼ同様の安全距離を用いている。

3.6 車両の発生

関のシミュレータではある 5 分間内の流入交通流量及び流入平均速度を所与として計算を行い、車両の発生については、乱数を与えてランダムに流入させている。しかし、このように発生させると、各時間ステップにおいて連続して発生してしまう可能性がある。すると、局地的な渋滞が発生し、流入平均速度を与えた意味がなくなってしまう。ここで、安全距離 x_{safe} を流入速度 v_0 の関数として設定し、前者との車頭距離がこの安全距離以上であれば車両を発生することとした。 x_{safe} の求め方は式(8)の通りである。

$$x_{safe} = \frac{W}{2} \arctan h \left(2 \frac{v_0}{v_{MAX}} - c \right) + d \quad (8)$$

このアルゴリズムで適切な交通量を再現できることは、関によって証明されている。

3.7 新しいモデルの提案

関の研究では α を定数としてシミュレーションが行われたが、本研究では α を v の単調増加関数とした。何故ならば、自動車の速度が小さい場合は、危険も小さいため自動車の感応は鈍く、自動車の速度が大きくなると、危険も大きくなるためより俊敏に感応すると考えられるからである。本研究では、自動車の速度が十分に大きければ、多少速度が大きくなっても、感応度が大きく上がることはないと考え、感応度が速度の対数関数であると仮定した。具体的な α の値は、式(9)及び(10)によって定めた。

$$\alpha = \frac{\ln(v+1.0)}{\ln(22.2+1.0)} + 1.0 \quad (9)$$

$$\alpha = 0.6 \frac{\ln(v+1.0)}{\ln(22.2+1.0)} + 1.4 \quad (10)$$

この考え方はスロースタートモデルといわれ、感応度の設定にあたっては広く用いられているものである。西のモデルでもスロースタートモデルが使われている。

第 4 章 数値実験

4.1 対象領域

前章で説明した手法に従い、実際に数値実験を試みる。数値実験の対象となる領域は、関の数値実験に倣い、首都高速道路都心環状線内回り神田橋入口の合流部とする。形状の特徴を以下に纏める[25]。

表 3:神田橋入口合流部の道路構造

車線数	本線	2
	入口	1
合流形式		左側合流
加速車線長		80[m]
道路施設との位置関係	上流	神田橋出口 310[m]
	下流	一ツ橋 JCT 分流 330[m]
入口料金所と合流ノーズの距離		140[m]
本線規制速度		50[km/h]

合流部の直近上流地点で収集された車両感知器データによって、2000 年 11 月 2 日の車線別の合流前の交通流量と平均速度が得られている。元データは 1 分間ごとのデータであるが、本研究では交通流量については 5 分間の値の和をとり、平均速度については 5 分間の値の調和平均をとって、数値実験を行うことにする。これらの情報を元に、入力データを作成し、シミュレーションの出力データから検証を行う。

4.2 結果

3.5 節で述べた関のモデルについて、3.7 節で述べた改良を施し、前節で述べた入力データを用いて数値実験を行う。3.7 節では、感応度に関して 2 つの式を提示したが、それぞれについて数値実験を行い、結果を比較する。

まず、式(9)に従った場合の計算結果のうち、走行車線に関しては図 13、追越車線に関しては図 14 に示す。

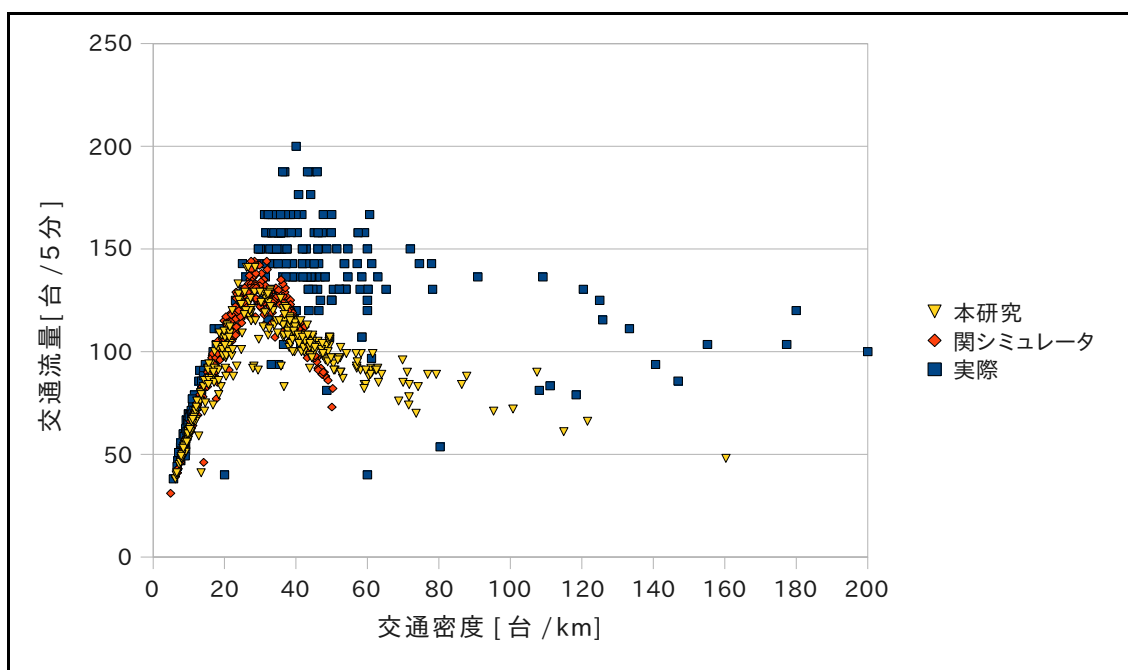


図 13:式(9)の場合の神田橋入口上流走行車線の基本図

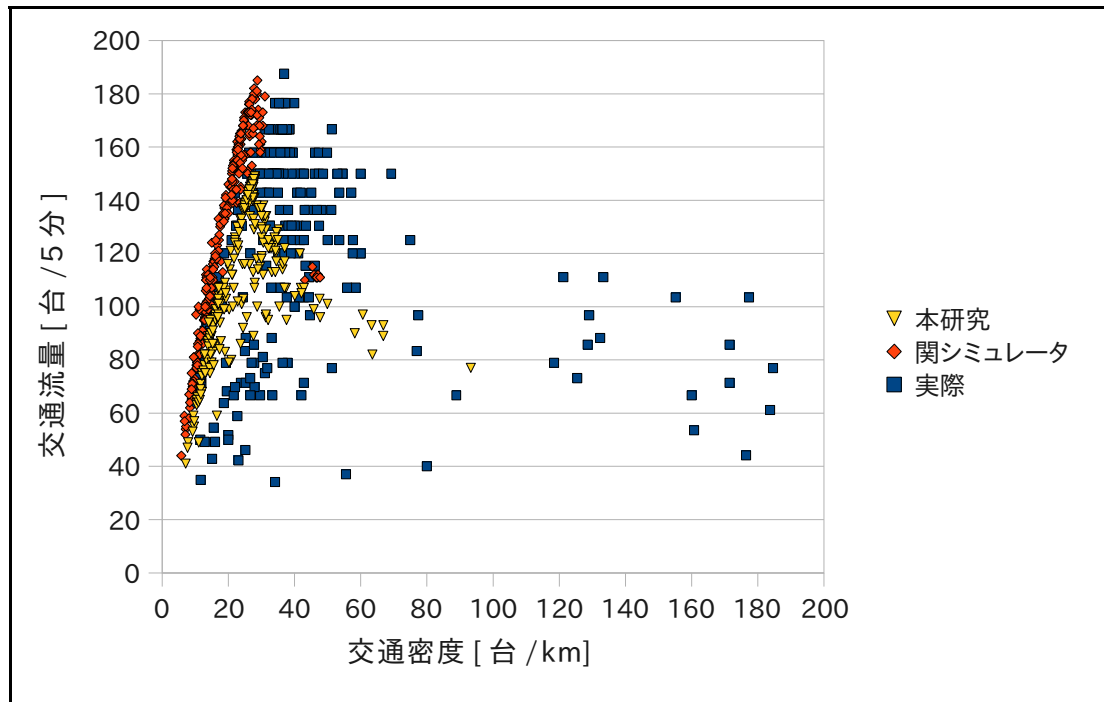


図 14: 式(9)の場合の神田橋入口上流追越車線の基本図

図 13・図 14 について説明する。交通密度が低いときは自由走行相となり、平均速度を表す基本図の傾きは大きいまま一定である。ある程度交通密度が高くなると、メタ安定となり、すぐに高流量渋滞相に移行してしまう不安定な相となる。図 15 に、メタ安定から高流量渋滞相に移行する瞬間のシミュレーション画像を掲げる。赤い自動車は合流車線から流入した自動車、緑の自動車は走行車線から流入した自動車、青の自動車は追越車線から流入した自動車を表す。1 台の赤い自動車の直後は、他と比べて車間距離が短い状態となっている。これは、走行車線を走行する自動車が、合流車線より走行車線に合流する自動車のためにブレーキをかけたためである。後続車は更に強くブレーキをかけるため、このまま交通密度が高い状態が続くと、やがて図 16 のような渋滞相に移行する。これらの図から、感応度を式(9)のように定めて、メタ安定や長時間の高流量渋滞の発現に成功したことが分かる。しかし、図 13・図 14 より、この数値実験では実際と比べて大幅に交通流量や交通密度が低下してしまったことが分かる。特に

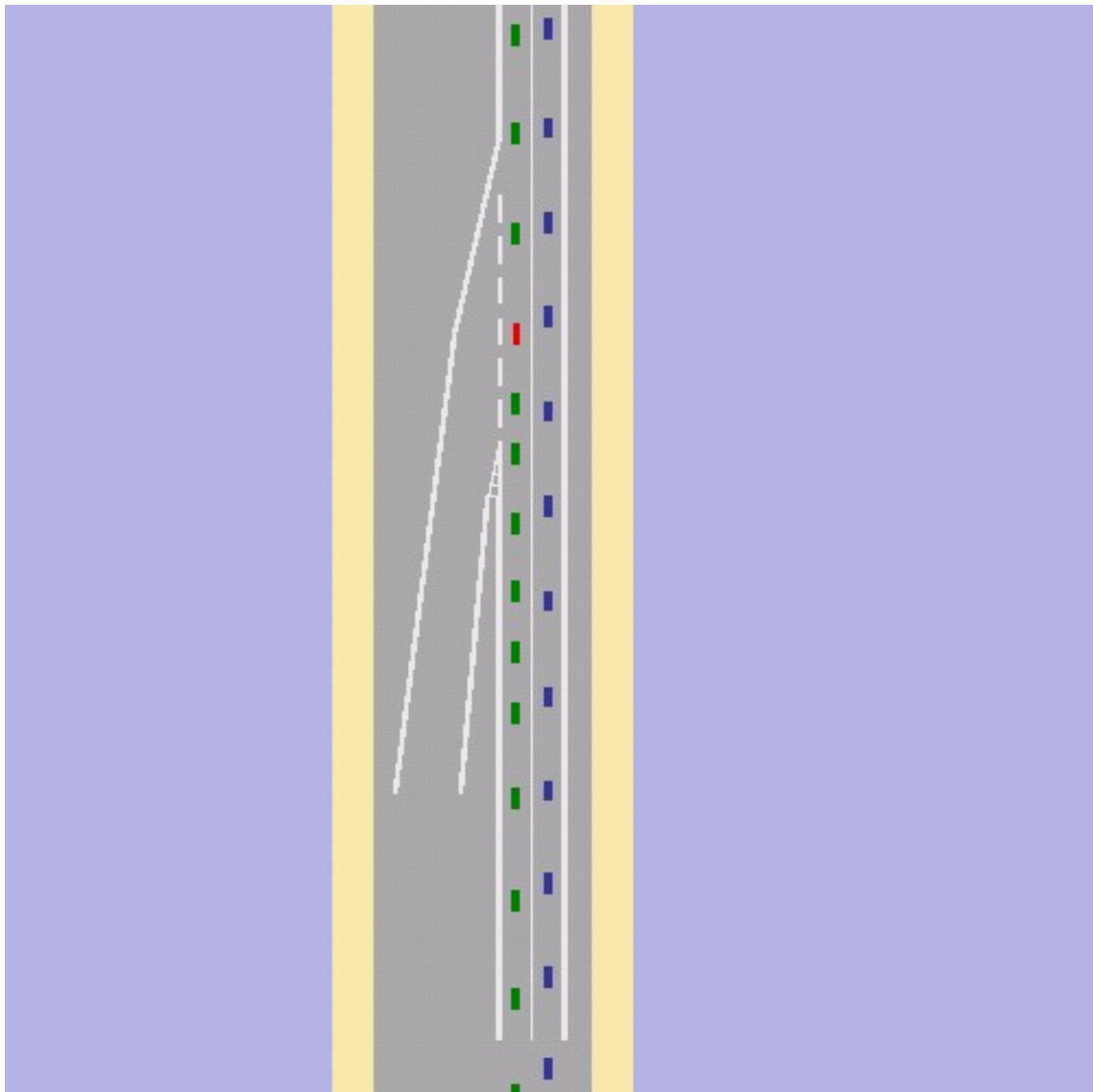


図 15: メタ安定から高流量渋滞に転移する瞬間

追越車線では、関のシミュレータとの差が大きく現れた。

続いて、感応度を式(10)のように定め、同様に数値実験を行った。実験の結果について、走行車線に関しては図 17、追越車線に関しては図 18 に示す。

図 17・図 18 より、感応度を式(10)のように定めても、交通流量・交通密度の大幅な低下を改善することはできなかったことがわかる。

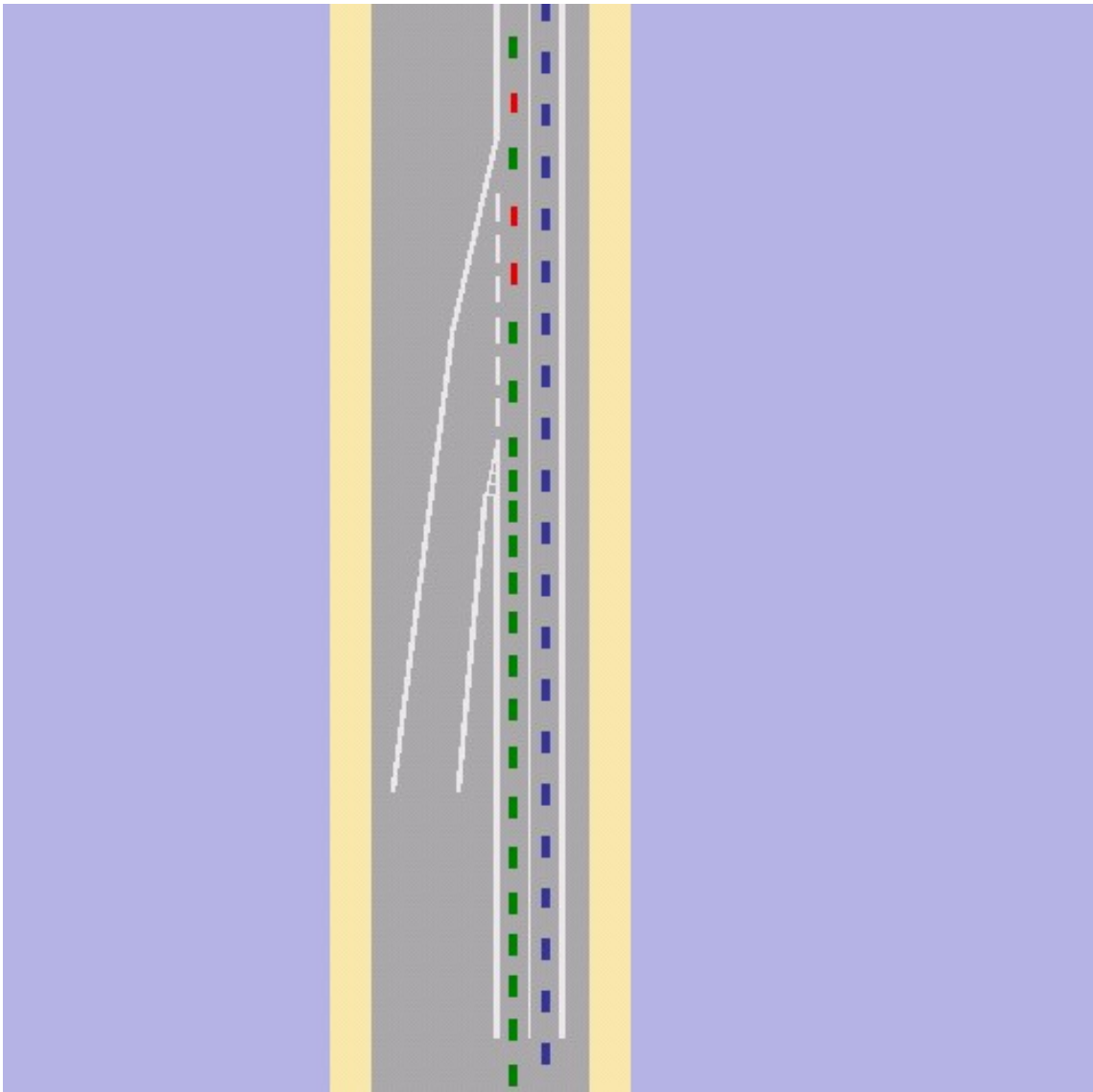


図 16: 渋滞相

4.3 考察

本研究で提案した感応度を用いた結果を表す図 13 には、関モデルの結果にはない特長として、平均速度 20[km/h]以下の渋滞相の発現が挙げられる。これは、スロースタートモデルによって低速域での加速度が小さくなったため、一度減速し再び加速するまでに関モデルより多くの時間がかかるようになり、渋滞が発生しやすくなったと考えら

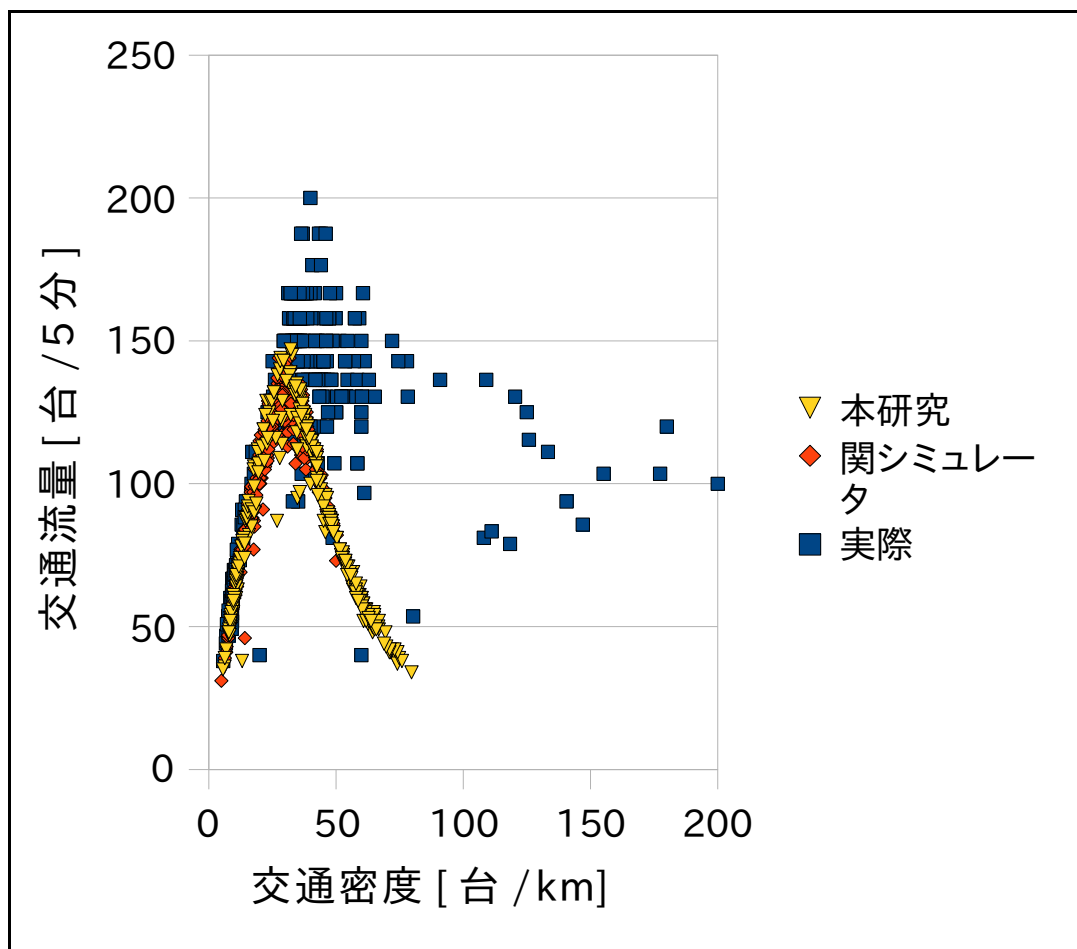


図 17: 式(10)の場合の神田橋入口上流走行車線の基本図

れる。又、関モデルよりもはっきりしたメタ安定や長時間の高流量渋滞の発現も確認できた。

しかし、本研究で提案した式(9)の結果・式(10)の結果共に、実際と比べて大幅な交通流量の低下が観察された。又、実際には 100[台/km]以上の交通密度となる時刻が存在するが、本研究で行った数値実験の結果では交通密度も低下する結果となった。

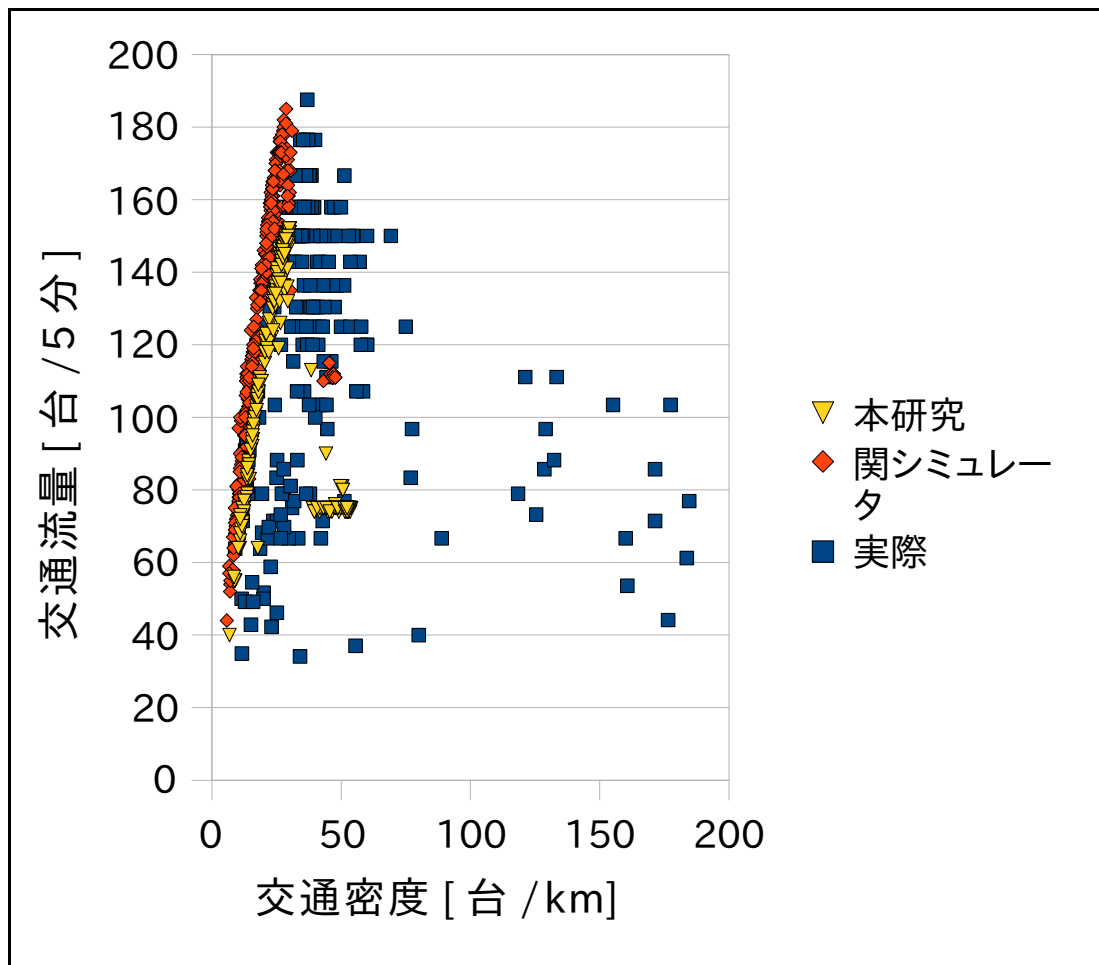


図 18: 式(10)の場合の神田橋入口上流追越車線の基本図

このような現象が起こった原因として、第3章で述べた、車線変更時の協調行動モデルに何らかの欠陥があることが考えられる。

第 5 章 結論

本研究では、関のモデルを改良し、合流部上流に於いてより現実に近い現象を再現することを目標としていた。そのうち感応度について、運転手の心理をモデル化したスロースタートモデルを採用することによって改良し、渋滞相、メタ安定や長時間の高流量渋滞を再現することに成功した。しかし、本研究のモデルでは、交通流量・交通密度を大幅に低下させる結果となった。

西のシミュレーションは織り込み部を対象としているため、追越のために任意の回数車線変更するという挙動は一切モデリングされていないし、実際の織り込み部では必的に多数の自動車が車線変更を行うため追越はほとんど起こらないと考えられる。しかし一般の高速道路では、追越は頻繁に起こる現象である。最適速度モデルという有力なモデルが存在する追従挙動と異なり、車線変更に関する挙動については未だに有力なモデルは存在しない。関シミュレータでは交通流量・交通密度が実際と比べて大幅に低下しているが、本研究によってそれが車線変更時の協調行動モデルに問題があるために引き起こされるものであることが分かった。

今回の実験で用いたモデルよりも信頼性の高いシミュレータの製作のために、より良い協調行動のモデルを提案・開発することが今後の課題である。

参考文献

- [1] 大蔵泉:「交通工学」, コロナ社, 1993
- [2] 佐佐木綱監修, 飯田恭敬編著:「交通工学」, 国民科学社, 1992
- [3] 樗木武・井上信昭:「交通計画学」, 共立出版社, 2002
- [4] 西遼佑:「織込部(weaving section)における交通流シミュレーション」, 東京大学工学部航空宇宙工学科卒業論文, 2006
- [5] 西成活裕:「渋滞学」, 新潮社, 2006
- [6] B. D. Greenshields:”A Study in Highway Capacity” , Highway Research Board Proceedings, Vol.14, 1955
- [7] H. Greenberg:”An Analysis of Traffic Flow”, Operations Research, Vol.7, No.1, 1959
- [8] D. R. Drew:”Deterministic Aspects of Freeway Operations and Control”, Texas Transportation Institute, Research Report, 1965
- [9] J. D. Bolland, M. D. Hall, D. Van Villet: SATURN: A Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Institute for Transport Studies Working Paper 106, Leeds University, 1979
- [10] M. D. Hall, D. Van Villet, L. G. Willumsen: SATURN – A Simulation-Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Traffic Engineering & Control, Vol. 21, pp. 168-176, April, 1980
- [11] 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田綽之:都市内高速道路における過飽和ネットワーク

- シミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol. 30, No. 1, pp. 33-41, 1995
- [12] C. C. Liu: Integrated Network Modeling with TRAF, Preprint at the Second Multinational Urban Traffic Conference, Beijing, China, May, 1991
- [13] A. K. Rathi, A. J. Santiago: Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering, Vol. 116, No. 6, pp.734-743, 1992
- [14] M. Van Aerde, S. Yagar: Dynamic Integrated Freeway / Traffic Signal Networks: A Routing-Based Modeling Approach, Transportation Research A, Vol. 22A, No. 6, pp. 445-453, 1988
- [15] 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫: 都市街路網の交通流シミュレータ-AVENUEの開発, 第13回交通工学研究発表会論文集, pp. 33-36, 1993
- [16] (社)交通工学研究会編:「ITS インテリジェント交通システム」, 丸善, 1997
- [17] 関計哉:「知的マルチエージェント交通流シミュレータにおける協調行動モデルの構築と検証」, 東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻修士論文, 2007
- [18] Stuart Russell, Peter Norvig著, 古川康一監訳: エージェントアプローチ 人工知能, 共立出版, 1997
- [19] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲:「マルチエージェントシステムの基礎と応用」, コロナ社, 2002
- [20] 本位田真一, 飯島正, 大須賀昭彦:「エージェント技術」, 共立出版, 1999
- [21] 長井亮一, 尾之内恒俊, 長谷隆:最適速度交通流モデルにおける矩形波の伝

- 播挙動, ながれ, 24, pp.421-429, 2005
- [22] Xing, J.: A Study on the Bottleneck Phenomenon and Car-Following Behavior on Motorways, Thesis of Doctor of Engineering, Univ. of Tokyo, 1992
- [23] 中山 章宏: 一次元交通流の追従模型, 応用数理, 12- 2, pp.109-117, 2002
- [24] 只木進一: 高速道路交通流の実測データと二車線模型, 応用数理, 12-2, pp.119-127, 2002
- [25] (社)交通工学研究会: 「交通容量データブック2006」, 丸善, 2006
- [26] M. Bando et al.: “Structure Stability of Congestion in Traffic Dynamics”, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics Vol. 11 No. 2, 1994
- [27] C. Guestrin, S. Venkataraman, D. Koller: Context Specific Multiagent Coordination and Planning with Factored MDPs, AAAI Spring Symposium, 2002
- [28] R. Kok, T. J. Spaan, N. Vlassis: Non-communicative multi-robot coordination in dynamic environments, Robotics and Autonomous Systems, 50, pp.99-114, 2005
- [29] Jelle R. Kok, Matthijs T. j.Spaan, Nikos Vlassis: An approach to noncommunicative multiagent coordination in continuous domains, Proceedings of the Twelfth Belgian-Dutch Conference on Machine Learning, pp.46-52, 2002.

謝辞

本論文を作成するにあたり、非常に多くの方々のご指導、ご支援、ご協力を賜りました。この場を借りて御礼申し上げます。

指導教員である文屋先生には、卒業研究に限れば半年間ですが、他の講義を含めれば1年半に亘って多くのことをご教示くださいました。特にプログラミング基礎の講義が無ければ、僕は一生プログラミングに対して強いアレルギーを持ったままだったでしょう。本当に感謝しています。

吉村先生には、僕の体調のことを本当に心配してくださって恐縮です。心から感謝いたします。

助教の杉本さんにはゼミで僕の進路に関係する興味深い話を伺うことが出来ました。今後の学習の参考になると思います。

技官の川手さんは研究室の癒し的存在でした。ありがとうございました。

研究員の河合さんと武居さんには、ゼミで興味深い話を伺うことが出来ました。

秘書の井上さん、上さんには、学生生活を営んでいく上で数多くの手助けを頂きました。

博士課程の藤井さんには、fMATES の Subversion を利用したチェックアウト・コミットの仕方や、fMATES の様々な仕様などを教えてくださいました。

博士課程の犬塚さんは、毎週のゼミの準備と進行をしてくださいました。

博士課程の南さんからは、ゼミで配管内の流体のシミュレーションに関する興味深い話を聞かせていただきました。

修士課程の小橋さん、高野さん、木村さん、大貫さんには、研究や発表の準備でお忙しい中、僕からのコンピュータやプログラミングに関する様々な質問をお受け頂き恐縮です。

修士課程の白根さん、狩野さん、向田さんのお蔭で学生生活がより充実したのになりました。

Sena さんや Victor さんには、文化や言語の違いから様々な刺激を受けることが出来ました。特に Sena さんには本当にいろいろお世話になりました。

同期の舟山君は、学部 3 年生との交流会を開いてくれました。ややもすると上下関係が希薄になりがちな学生生活において、貴重な場だったと思います。

最後に、病弱な僕に対しても、長い期間に亘って、毎日大きなサポートをくれた両親に最上級の感謝を申し上げます。ありがとうございました。