

# 複数車線における車線変更を考慮した渋滞の解析に資する交通流モデルの構築

長島 史苑 安藤 崇央

高速道路における渋滞損失時間は近年上昇中である。渋滞の原因のほとんどはサグ部で発生しているものであり、この部分に着目して研究が進められている。本研究では今までのモデルを拡張し、二車線で動作する交通流モデルを作成した。そして、交通流基本図を作成し、現実で観測される交通流基本図と比較して評価を行った。

## 1 はじめに

高速道路における渋滞損失時間は図 1 のように、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の影響による外出自粛の制限緩和により、近年また増加傾向にある。渋滞損失時間における原因のほとんどが交通集中による渋滞であり、中でも上り坂、サグ部における交通渋滞が 6 割ほどを占めている (図 2)。この問題の解決方法の 1 つとして、近年各自動車メーカーが開発が進んできている車間距離制御 (ACC, Adaptive Cruise Control) 技術を搭載した車両を渋滞に混走させる研究に注目されている。そこでは簡易的な ACC 搭載車両の数理モデルが提案されている。また、渋滞の発生する一車線の高速道路のシミュレーション環境で、その ACC 車両を混走させ、渋滞にどのような影響が出るかを確認している。しかし、現実の高速道路は複数車線であることがほとんどであることから、現実に近い環境で観測を行うため二車線で動作するシミュレータの作成が求められている。

本研究では、これまでのモデルを拡張し、二車線の高速道路上のシミュレーションモデルを構築する。

Traffic flow modeling for analysis of traffic congestion considering lane changes in multiple lanes.

Shion Nagashima, 群馬大学大学院情報学研究所, Graduate School of Informatics, Gunma University.

Takahiro Ando, 群馬大学大学院情報学研究所, Faculty of Informatics, Gunma University.

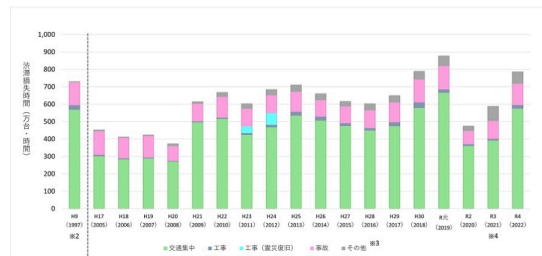


図 1 渋滞損失時間の推移 [1]

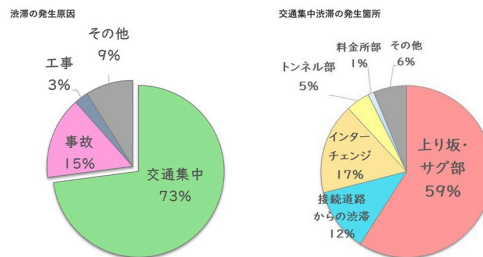


図 2 渋滞の発生原因と発生場所 [1]

二車線にすることで車の追い抜き、追い越しが発生し、実際の道路状況に近い環境で動作するモデルの構築を目指す。

## 2 関連研究

先行研究として、サグ部が原因で発生する渋滞の離散的モデル、IDM+[2] を速度決定式として利用した

片側一車線の高速道路モデルがある。また、複数車線での車線変更の意思決定アルゴリズムを採用した交通流シミュレータ MovSim [3] が、関連研究として挙げられる。

## 2.1 渋滞について

高速道路上で起こる渋滞として、本研究ではサグ部での渋滞に注目して実験を行なう。サグ部とは目視で確認しづらい緩やかな下り坂の後に緩やかな登り坂が続くような道路の総称である。運転手がその勾配変化に気づくことができずに自然に車の速度が低下してしまう。その速度低下に気づいた後続車がブレーキを踏んでしまうことでブレーキが後続へ連鎖し、渋滞へと繋がってしまう。

現在ではサグ部の開始を示す標識を設置したり、一定速度で走行する手助けとなるペースメーカーライトの導入で渋滞の軽減を図っている。

## 2.2 実行環境

本研究ではシミュレーションプラットフォームとして、マルチエージェントプラットフォームである artisoc Cloud [4] を利用する。マルチエージェント・シミュレーションとは複数の車両（エージェント）が決められたルールで動いていく中で、相互に影響を及ぼしながらシミュレーションを進めていく環境である。

## 2.3 artisoc Cloud とは

構造計画研究所が提供している python ベースのシミュレータである。ステップを進めるごとにそれぞれのエージェントが相互に影響し合い、次のステップの振る舞いを決定する。図 3 は artisoc Cloud でのシミュレーションの様子である。

## 2.4 IDM+について

本研究で実装するシミュレータ上で動作する車両の加速度決定式には先行研究と同じ IDM+ (Intelligent Driver Model+) [2] を使用する。式は 1 で表される。

$$\frac{dv}{dt} = a \cdot \min \left[ 1 - \left( \frac{v}{V_0} \right)^4, 1 - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

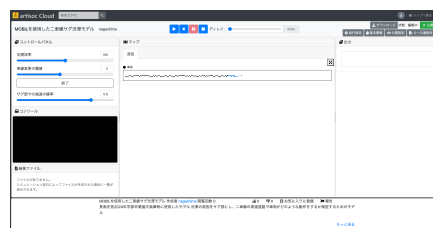


図 3 artisoc cloud でのシミュレーションの様子

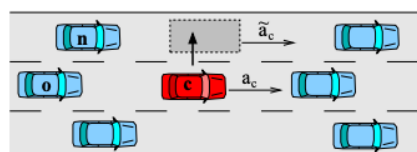


図 4 MOBIL による車線変更 [5]

$$s^*(v, \Delta v) = S_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$$

$a$  は希望加速度、 $b$  は希望減速度、 $v$  は走行速度、 $v_0$  は希望速度、 $\Delta v$  は前走車との相対速度、 $s$  は車間距離、 $S_0$  は最低車間距離（停止時車間距離）、 $T$  は安全車頭時間（走行時に取るべき車頭時間）である。

式の概要を簡潔にまとめると、各車両が希望する加速度に制限をかけて加速度を決定している。式 1 の通り左項と右項の値の小さい方を希望加速度にかける。このように処理をすることで先行車が近くにいる場合は希望速度まで加速をする走行をする。先行車がいる場合は右項が採用され、先行車との距離、自分の制動距離を考慮し、加速度に制限を設ける。

## 2.5 MOBIL について

現実世界ではドライバーが車線変更をする動機として、先行車の速度低下や追越車線に車が来ていないかなど、さまざまな要因が考えられる。この要因を全てシミュレータに組み込むのは非常に困難である。そこで本研究では車線変更の意思を決定する数理モデルとして MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane Changes) [5] を採用した。

MOBIL の特徴として、車線変更によって得られる自車の加速度と、周りに与える加速度の変化を考慮し

て車線変更を行う。

$$\tilde{a} \geq -b_{\text{safe}} \quad (2)$$

$$\underbrace{\tilde{a}_c - a_c}_{\text{自分の車}} + p(\underbrace{\tilde{a}_n - a_n}_{\text{新しい後続車}} + \underbrace{\tilde{a}_o - a_o}_{\text{以前の後続車}}) > \Delta a_{th} \quad (3)$$

式3はこれを数式で表現したものである。また、これにより道路全体が滞りなく車が走行できるように車線変更を行うモデルが得られる。また、礼儀正しさ係数  $p$  により、各車両の運転特性にばらつきを持たせ、車線変更をする動機に変化を持たせることができる。式2は車線変更を行うにあたり必ず確保される安全車間距離  $b_{\text{safe}}$  を設定している。そのため車が接触することなく安全に車線変更を行うことができる。

### 3 シミュレータの構成

#### 3.1 先行研究のモデル

先行研究で作成されたモデルは、全長 20km、片側一車線の高速道路を想定している。道路上にサグ部を設定し、車両が通過すると一定確率で減速することでサグ部を再現している。IDM+を加速度決定式として採用し、車両が生成された時点で後続車に自分の速度や座標を渡すことで加速度を決定している。各車両はひとつ前の車の情報しか持たないため追い抜きや追い越しができない。

#### 3.2 本研究で新たに作成したモデル

本研究では先行研究のモデルを拡張し、全長 10km、片側二車線の高速道路を実装した。速度決定式には IDM+を、車線変更の動機づけとして MOBIL を使用した。車線変更機能の追加のため、artisoc Cloud のもつ周辺のエージェントの情報を取得する機能を使用し、図5のように各ステップで各車両が周辺を探索し、前方、左前、左後ろ、後方、右前、右後ろのように車両を認識する機能を付け加えた。これにより、MOBIL のパラメータに必要な変更先車線の後方車と元いた車線の後方車の加速度、変更先車線の先行車との安全車間距離を得られる。各ステップが進むごとにそれぞれの車両は自分の周囲 150m を探索する。そうして探索した車の中から図6のように条件に合

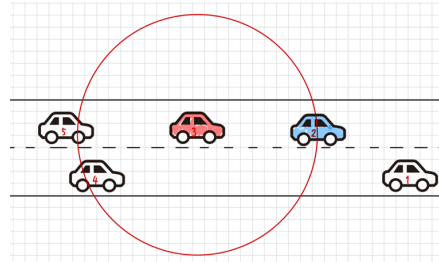


図5 artisoc Cloud の組み込み関数による車両探索

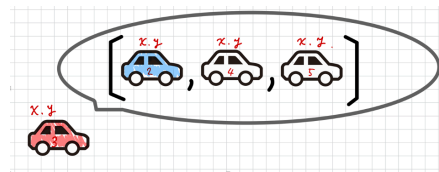


図6 探索した車を判別

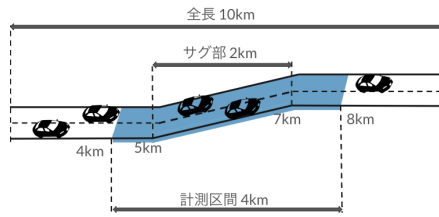


図7 シミュレータの道路構成

う車両を並び替えることで車両の位置関係を取得している。

次にシミュレータ全体のマップの説明をする。本研究で作成したシミュレータは図7に示す通り片側二車線、全長 10km の高速道路を想定したモデルである。5km 地点から 7km 地点までサグ部が続く。また、4km 地点から 8km 地点の密度と流量を計測することとした。

### 4 モデルの妥当性の検証

#### 4.1 モデルの検証方法

道路状況を数理的に求める重要な指標に、交通流率  $q$ 、交通密度  $k$ 、空間平均速度  $v$  がある [6]。交通流率は単位時間で車両が何台通過したか、交通密度は単位距離あたりに何台の車両が存在しているかを表す。

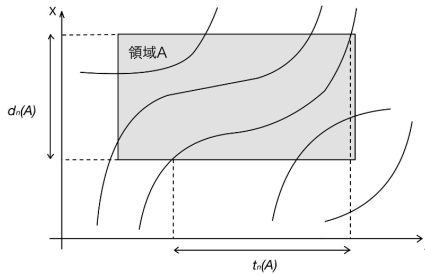


図8 Edieの一般交通状態の定義

この3つの値には恒等式

$$q = kv \quad (4)$$

が成り立つ。交通流率の素朴な計算法としては、一定時間に決められた地点を通過する車両台数  $M_T$  を計測し、計測時間長  $\Delta t$  で除すというものがある。これは地点流率  $q_T$  と呼ばれ

$$q_T([t, t + \Delta t], x) = \frac{M_T}{\Delta t} \quad (5)$$

と表せる。交通密度の素朴な計算法としては、ある時刻  $t$  に写真を撮影し、位置  $x$  から  $x + \Delta x$  の間に存在する車両台数  $M_S$  を数えるというものがある。

$$k_S(t, [x, x + \Delta x]) = \frac{M_S}{\Delta x} \quad (6)$$

これらの交通状態の定義は正確ではあるものの、限界がある。まず、これらの定義は時空間における線上で定義されており、ある時空間の面的な流率、密度を求めることができない。

また、別の問題として、地点流率、空間密度、空間平均速度は計測対象の交通流が互いに異なるため、これらの状態量間では一般に恒等式  $q = kv$  が成り立たない。これらの問題を克服するため、Edieの一般化交通状態の定義[7]が用いられる。これらは時空間に任意に定義できる領域  $A$  に対して定義することができる。図8に領域のグラフを示す。

$$q(A) = \frac{1}{|A|} \sum_n d_n(A) = \text{交通流率 [台 / 単位時間]} \quad (7)$$

$$k(A) = \frac{1}{|A|} \sum_n t_i(A) = \text{交通密度 [台 / 単位距離]} \quad (8)$$

$$v(A) = \frac{\sum_n d_n(A)}{\sum_n t_i(A)} = \frac{q(A)}{k(A)} [\text{台 / 単位距離}] \quad (9)$$

ここに、 $|A|$  = 領域  $A$  の面積、 $d_n(A)$  = 車両  $n$  の領域  $A$  内の走行距離、 $t_n(A)$  = 車両  $n$  の領域  $A$  内の走行時間と定義する。

ここで、Edieの一般化交通状態の定義が交通状態の定義として合理的であることを、次元解析により交通状態の次元と一致することを確認する。 $q(A)$  の次元は台  $\text{km}/(\text{km h})$  すなわち  $\text{台}/\text{h}$  であり、流率の次元と一致する。 $k(A)$  の次元は台  $\text{h}/\text{km h}$  であり、すなわち  $\text{台}/\text{km}$  で密度の次元と一致する。 $v(A)$  は明らかに速度の次元と一致している。

次に、Edieの一般化交通状態の定義が地点流率などの素朴な定義を内包することを確認する。領域  $A$  を時間長  $\Delta t$ 、空間長  $\Delta x$  の矩形と設定し、 $\Delta x$  を無現小に近づける。 $\Delta x$  が十分に小さい場合  $d_n(A) = \Delta x$  とみなせるので、 $M$  を領域  $A$  内の車両台数とすると、流率は

$$q(A) = \frac{1}{|A|} \sum_n d_n(A) \simeq \frac{M \Delta x}{\Delta t \Delta x} = \frac{M}{\Delta t} \quad (10)$$

となる。これは地点流率  $p_T$  の定義(5)と一致する。同様に、

$$k(A) = \frac{1}{|A|} \sum_n t_i(A) \simeq \frac{M \Delta t}{\Delta t \Delta x} = \frac{M}{\Delta x} \quad (11)$$

と求めることができ、これは空間密度  $k_S$  (6) と一致する。これにより、 $q = kv$  が自動的に満たされ、任意の時空間領域における交通状態を車両軌跡に基づき矛盾なく計算できる。

こうして求めた流率、密度を表した図として、fundamental diagram (交通流基本図) を求めることができる。交通流基本図はその名の通り交通流学において基本となる図で、縦軸を流率(流量)、横軸を密度とする。また式4より、傾きが空間速度となる。この基本図は図9のような3つの相で構成されている。本研究ではこの3つの相に着目して評価を行う。

図10は実際の道路における流量と密度を測り、プロットした図である。今回のモデルもこのように値をプロットして基本図を作成する。

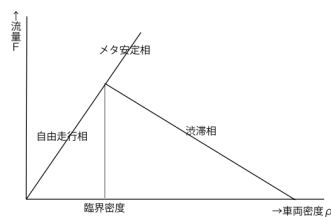


図 9 交通流基本図 [8]

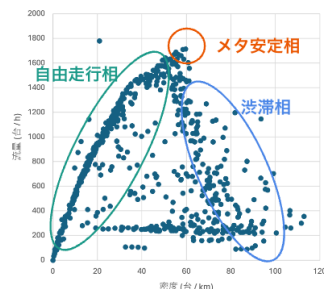


図 12 確認された 3 つの相

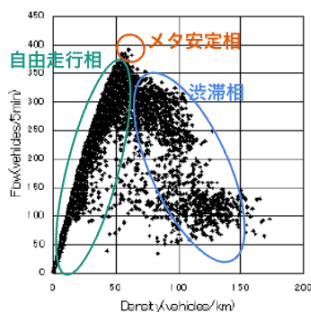


図 10 現実の交通流基本図 [9]

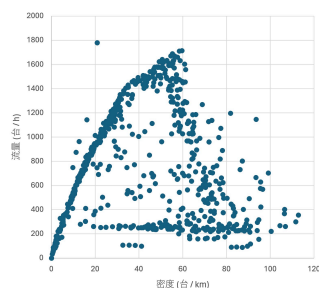


図 11 出力された基本図

## 5 評価

### 5.1 モデルの評価

今回作成したモデルは全長 10km、5km 地点から 7km 地点までサグ部が続く高速道路という条件を設定した。車両を計測する区間を 4km 地点から 8km 地点に設定し、5 分ごとに流量と密度の計測をした。60 回シミュレータを稼働させ、得られたデータ 720 個をプロットした。出力された基本図を図 11 に示す。

### 5.2 考察

図 12 を見ると自由走行相、メタ安定相、渋滞相の 3 つの相が確認できる。自由走行相では車両進行の妨げになるものがなく、各車両がスムーズに走行する。密度が増えても車列が綺麗に流れるため、侵入する車両が増える。そのため車両密度と共に流量も増加する。メタ安定相は渋滞が起こりうる車両密度に至っても、車両が増え続ける相である。道路のキャパシティを超えても密度と流量が増え続けるということは、各車両の車間距離が短くなっているということであり、少しでもブレーキをかける車があるとブレーキの連鎖が発生し、すぐに渋滞相に移ってしまう。渋滞相では道路に存在する車の数が増加するが、車列が流れないので後続が侵入することができず、密度が増加するにつれて流量が減少する。

また、シミュレータから出力された基本図の臨界密度は 1km あたり 60 台であった。現実の一般的な直線の二車線道路の臨界密度は 50 台前後と言われており [9]、現実の臨界密度より 10 台高い結果となった。この原因として挙げられるのがトラックの有無である。今回作成したシミュレータでは全ての車両の長さを 5m で統一している。しかし現実の道路ではトラックのように全長が長い車も走行しており、一般車より道路の占有面積が大きい。そのため今回の実験で得られた結果では臨界密度が高くなったと推測される。

## 6 まとめ

本研究では先行研究で構築された一車線の高速道路を想定したモデルを拡張し、二車線道路の構築を行った。サグ部での無意識下の速度低下を渋滞の原

因とし、流率と密度の測定をした。また、二車線道路の構築に伴い車線変更機能の追加を行った。車線変更の動機づけに MOBIL を採用し、目視で車線変更が行われていることを確認した。シミュレータから出力された基本図は、現実の基本図でも確認できる3つの相が確認でき、現実での交通状況に近いシミュレータを構築できたと言える。臨界密度については現実の臨界密度より10台高い結果となった。考えられる原因として車両の長さが挙げられる。今回のシミュレータでは車両の長さを統一したため、トラックなどの全長が長い車を考慮することができていない。そのため、道路を占有する面積が減少し、臨界密度が上昇したと考えられる。

今後の展望として、本研究の本来の目的である ACC 車両を混走させ、渋滞の観察、および旅行時間や消費エネルギー量の調査、改善をすること。車両の種類を増やしシミュレータの精度を向上させることが挙げられる。

## 参考文献

- [1] NEXCO 東日本. 高速道路の渋滞対策. [https://www.e-nexco.co.jp/activity/safety/detail\\_07.html](https://www.e-nexco.co.jp/activity/safety/detail_07.html).
- [2] W.J.Schakel, B.van Arem, and Bart Netten. Modeling human drivers. [https://www.researchgate.net/publication/224190729\\_Effects\\_of\\_Cooperative\\_Adaptive\\_Cruise\\_Control\\_on\\_traffic\\_flow\\_stability](https://www.researchgate.net/publication/224190729_Effects_of_Cooperative_Adaptive_Cruise_Control_on_traffic_flow_stability), Oct 2010.
- [3] Arne Kesting, Martin Treiber, Ralph Germ, and Martin Budden. Multi-model open-source vehicular-traffic simulator. <https://github.com/movsim/movsim>, 2010 - 2017.
- [4] 構造計画研究所. artisoc cloud. <https://artisoc-cloud.kke.co.jp/>.
- [5] Arne Kesting and Dipl.-Phys. Mobil: General lane-changing model for car-following models. [https://www.mtreiber.de/publications/MOBIL\\_TRB.pdf](https://www.mtreiber.de/publications/MOBIL_TRB.pdf), 2006.
- [6] 桑原雅夫. 交通流理論. march 2020.
- [7] 瀬尾亨. マクロ交通流シミュレーション. pp. 17–19, October 2023.
- [8] 萬屋賢人, 菅原俊治. 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価. 情報処理学会論文誌 数理モデルと応用 Vol.4 No.4, pp. 1–9, November 2011.
- [9] 西成活裕. 交通流のセルオートマトンモデルについて ((特集) 交通流の数理). 応用数理 12 巻 2 号, pp. 128–139, 2002.