

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820247

研究課題名(和文) 運転者間で醸成される「雰囲気」と交通流円滑性

研究課題名(英文) Modeling traffic flow as exchange interactions in an "atmosphere" field shared with drivers

研究代表者

葛西 誠 (KASAI, Makoto)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：20579792

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高速道路上のサグ等における渋滞発生メカニズムを、一般的な1対の追従ペアのモデル化を通してではなく、いくつかの車両の挙動を集合的に取り扱うことで説明を試みる。すなわち、ドライバーが周囲の“雰囲気”としての車頭時間に影響されると考え、各車両の車頭時間が時空間方向に相互に作用し揃いやすくなると仮定する。ドライビングシミュレータによる実験データに基づき、当該モデルの妥当な構造について代替案を比較検討する。さらに、渋滞発生後の渋滞解消策として、周辺車両を一斉に大きな加速度で増速させ、渋滞解消の雰囲気を演出することの効果を実験的に検討し、一部のドライバーにはあるが狙い通りの効果があることを確認する。

研究成果の概要(英文)：This study discusses an effect of "atmosphere" shared with neighboring drivers in traffic flow to model and mitigate bottleneck phenomena in access-controlled section. First, traffic flow is modeled as exchange interaction in time headway instead of modeling car-following behavior based on homogenous traffic flow data collected by a driving simulator. Second, Hierarchical Bayesian Estimation is applied to estimation of robustness of exchange interaction in time headway. Markov Chain Monte Carlo methods and Type-II maximum likelihood estimation method are implemented for the estimation. As a result, the interaction in time headways in chronological order dominates in other interactions such as those of successive cars. Finally, a measure for improvement of discharge flow rate is tested. In the experiment, an effect of acceleration of neighboring cars is measured by a driving simulator. Some drivers steadily follow the leader in case of high acceleration rate of neighboring cars.

研究分野：交通工学

 キーワード：交通流 交通容量 容量上の隘路現象 交換相互作用 ドライビングシミュレータ 追従積重ね試験  
階層ベイズ

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 未だメカニズムの解明されていない交通容量上のボトルネック現象

ETC(Electronic Toll Collection System)の利用率が90%以上となった今、残存する高速道路の渋滞はサグやトンネルといった単路部ボトルネックによるものがほとんどとなった。国や民間を挙げたACC(Adaptive Cruise Control)導入による単路部渋滞の解決を図ろうとするプロジェクトも推進されるなど、解決への社会的要請も一段と強くなっている。

しかしながら、そもそもなぜ渋滞が生じるのかは、交通工学上の未解決であり最も難解な課題の一つである。車線数が変わらないにも拘わらず、流せる台数(交通容量)が小さい断面が自然と生じるのである。これを「容量上のボトルネック現象」と呼んでいる。この現象が認識されたのは1970年代後半の日本においてであり、以降、越に始まるいくつかの注目すべき取り組みが世界を牽引してきたが、未だに「どこがボトルネックになるのか」「容量はいくつになるのか」が予測できない状況にある。すなわち、道路の計画・設計、あるいは改良・運用において事前に発揮される性能がわからないまま、経験的に対処しているのが現状である。

### (2) 追従挙動のモデル化による現象説明の限界

先の越の仮説は、論理的には明快である。「交通流が個々の車両の挙動、特に追従挙動の累積で生じる以上、追従挙動とボトルネック地点(あるいは容量)に何らかの関係がある」との主張である。しかし、この立場に立った著者も含めた多数の研究事例は、残念ながら未だにボトルネック容量を予測できないでいる。このことは追従挙動のモデリングによってボトルネック現象を説明しようとする接近法に限界があることを示唆しているようにも思われる。

例えば著者は、人間のある種の学習効果が数秒のオーダーでも発揮されると考えた短期履歴の学習効果(すなわち将来予測モデル)型の追従モデルを提案し、一定の説明力を有することを確認している。このことは、一般の追従モデルの構造である「近視眼的なフィードバックモデル」が人間の追従挙動を適切に表現していない可能性を示唆するものである。

### (3) 「雰囲気」なる相互作用の存在可能性

例えば反対車線の見物渋滞のように、進行方向のみ扱う追従理論では説明し難いことから、横方向の車両の動きが影響することが示唆される。また、著者らが進めているドライビングシミュレータを用いた追従挙動解析でも、隣接車線の車両の動きに依存する傾向がある。先行車の挙動のみに追従車挙動が依存すると仮定する既往の追従モデルに合致しない傾向、隣接車線の車両配置間隔や

速度に「引きずられる」傾向がみられるのである。

会議の場で、「なんとなくそういう雰囲気だから、そうしましょう」とはよくみられる光景だが、先行車以外の周辺車両の挙動は「雰囲気」そのものであり、これに同調する傾向は「共有される雰囲気が、交通流を支配する」ことに相当すると考えられる。

## 2. 研究の目的

### (1) 雰囲気依存交通流モデルの模索

容量上のボトルネックにおける渋滞発生時の現象を、追従モデルではなく「雰囲気に依存する形式で書かれた交通流モデル(以下、『雰囲気依存交通流モデル』とする)」によって表現できるか否かを検証するのが第1の目的である。

「雰囲気」なる変数は、周辺車両との動きの相互作用を司ると仮定する。これは統計物理学における磁性体モデルのミクロなスピン間の交換相互作用と極めて似た概念である。例えば、以下のような類推が可能である: 温度が、時間方向の履歴依存性すなわちスピンの動きの速さに対応すること、交換相互作用係数が、「雰囲気」の共通性に対応すること、すなわちスピンの揃いやすさに対応すること、である。先行車からのみ影響を受ける一般的な追従挙動モデルとは異なり、周辺との相互作用項を考慮することが特色である。

この形式のモデルが妥当であるならば、渋滞発生時の交通容量そのものの推定モデル構築と、そのモデルから導かれるはずの効果的な渋滞発生抑止策の立案に繋がると期待される。もちろん、ここでの「雰囲気依存交通流モデル」の参考となる研究は少なくとも交通工学分野には見られないため、相応の試行錯誤が要求されるし、モデル化に際してもこの取り組みを支える満足な推定技術は統計科学では既に一般的であっても当該分野には未だ浸透しておらず、モデル推定技術の適用性検討を含めた準備が不可欠と考えられる。これらを要約すれば以下の通りとなる。

モデル検証用データ取得に係る工夫: 雰囲気依存型交通流モデルの推定に適したデータの取得方法の工夫は、本研究の遂行の上で大前提となる。「研究の方法」にて述べるように、ドライビングシミュレータ(DS)の特徴を十分に引き出すことで、運転の個人差等を分離でき、サグ渋滞の主たる支配要因と考えられる縦断線形の影響のみを含んだ交通流観測が可能となると考えられる。

モデルフィッティングの工夫: 縦断線形の影響のみを抽出できるようなモデル化の方法である。雰囲気に依存することの仮説をどのようにして取り込むかである。事前の知識としての「車頭時間が周囲の車両のそれと何らかの作用をする」と仮定し、その作用の強さが縦断線形によって異なると考えているため、ここに階層的なデータの構造を考え

ることが可能である。すなわち階層モデルの推定法の実装が必要である。交通工学分野に限って言えば、本研究着手時点では類似の事例は筆者の知る限りない。

## (2) 渋滞終了の雰囲気醸成する方法

第2の目的は、渋滞が発生してしまった後の渋滞解消を早めるために寄与する施策の模索である。少なくとも都市間高速道路においては、渋滞発生後渋滞先頭から流出する交通流率（捌け交通量）は、渋滞発生直前に比べて低いことが知られているが、これを十分高い量に引き上げれば解消が早くなると期待される。

捌け交通量が低くとどまることは、信号交差点等と比較して渋滞先頭地点であることをドライバーが認識することが困難であるため、加速が緩慢となりがちであること、また加速しようと試みてもサグ部の相対的な上り坂部で十分なアクセル補償動作が十分にできないことよるとの仮説が示されているが、本研究は前者に係るものである。すなわち、渋滞先頭地点であることを「ドライバー間で共有」してもらい、力強い加速を促すのである。本課題では、限定的に「隣接車線の車がいずれも大きな加速度で加速していく」状態に晒された場合に、その加速に引きずられて自車も積極的な追従を行なうか否かを検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) ドライビングシミュレータを活用した追従積重ね試験

試験方法の基本的考え方：単路部交通流の理解にドライビングシミュレータを活用することは近年有力な選択肢となりつつある。さらに、雰囲気依存性モデルの検証用データの取得には、追従積重ね試験と呼ばれる技法が有効である。実路上でのデータは、車種の相違や運転特性の相違、照度や気象条件の違いが混入し、これを系統的に分離することは極めて困難と言わざるを得ないが、大口・飯田が初めて提案した追従積重ね試験では、同一被験者が繰り返し同じ区間を追従走行し交通流を生成する、すなわち、先行車は同一被験者の直前の走行と同様の動きをし、自分自身が自分自身を追従することとなるので同一の運転特性を持ったドライバーのみで構成された交通流が生成されることが期待される。

使用機材およびコース設定：実験に用いるドライビングシミュレータは本田技研工業製、6軸モーションによって、縦断勾配や車両加減速による加速度が体感できる仕組みである。

利用するコースは2種類であり、「緩サグ」と「急サグ」と名付ける。急サグは東北自動車道(上)矢板IC-宇都宮IC間の通称矢板サグを、緩サグは東北自動車道(下)羽生IC-館林ICの利根川橋上流のサグの縦断線形をそれぞ

れ模擬する。どちらも有名な単路部ボトルネックである。

試験に参加する被験者は20名である。10名は緩サグのみを走行し、積重ね回数は30回程度を目標とする。他方の10名には、緩サグおよび急サグの両コースを走行してもらう。積重ね回数はそれぞれ20回程度を目標とする。いずれの被験者も週1回以上運転機会がある。

### (2) 雰囲気依存モデルの推定

雰囲気依存モデルにて仮定される「車頭時間の相互作用」をどのように仮定すべきか、それらを(1)にて取得されたデータによって如何に推定すべきかが技術的な課題となる。基本的には、「相互作用」として考え得る形式を「事前の知識」すなわち「事前分布」として与え、さらにその相互作用の強さがサグ毎に異なっていると考え、事前分布を支配する「超事前分布」を与えることとする。追従積重ね試験データから得られる車頭時間データに対しての適合度を測る「データ分布」を与えると、階層ベイズモデルによって記述されることとなる。これを周辺分布最大化することで、相互作用の強さを推定する問題となる。

事前分布の型およびデータ分布の型によって、具体的に適用できる解法は異なってくる。汎用的なものはマルコフ連鎖モンテカルロ法であり、将来の拡張性を考えてこれの適用を試みる。一方で、事前分布およびデータ分布のいずれもが正規分布であれば、最小二乗法の問題として扱えるため、これも試みることとする。

なお、相互作用の形式によっては、ボトルネック直上でいわゆる臨界現象が生じていると考えることも可能である。この場合、マルコフ連鎖モンテカルロ法によって直接検証することは難しい。収束が極めて遅くなることが生じるものとされている。現段階ではそもそも交換相互作用に類する作用がどのような形式であるかを考えることも手探りであるから、最終的にはサグの違いによる相互作用の違いを知ることが目標ではあるものの、まずはこのような相互作用を考える価値があるかどうかについて判定することを最初に取り組みべき検証と考える。

### (3) 渋滞先頭における雰囲気依存実験

先述の通り、渋滞先頭位置での緩慢な追従を防止し、先行車への追従を促すことが、周囲の車両の動きによって実現できるかを検証する。実験に用いるドライビングシミュレータは(1)と同一、使用コースは緩サグとする。被験者は走行車線を走行し、車線変更および追越を禁止する。走行車線には先行車があり、当初渋滞流中相当の速度で走行させ、徐々に加速させる。すなわち渋滞先頭位置のような緩やかな加速を再現させる。追越車線には、約40m間隔で車両を並べる。この追越車線上

の車も、被験者に対する先行車が加速していくタイミングで加速していくが、このときの「追越車線の車両の加速度」、「追越車線上の前後に連続する車両について、先行車の加速に対する反応遅れ時間」をそれぞれ3パターン用意する。これらの狙いは「追越車線の加速度が大きい場合、走行車線を走行する被験者は走行車線の先行車に追従する」との仮説を検証することにある。なお、当該実験の被験者は、週1回以上運転機会のある10名である。

#### 4. 研究成果

##### (1) 追従積重ね試験による雰囲気依存交通流モデルの推定

追従積重ね試験結果の一例を示す。図-1および図-2は、緩サグおよび急サグを走行した被験者（B-02）の追従積重ね試験結果のTime-space図である。いずれも、縦断曲線区間（いわゆるサグ底）付近で速度が遅くなり減速波が生じていることが見てとれる。減速波面を通過した後、サグ部上り坂区間で線の間隔が広がっており、したがって流率がサグ部上り坂で低くなっていることがわかる。このような傾向は、ほぼ全ての被験者について共通に見られる。

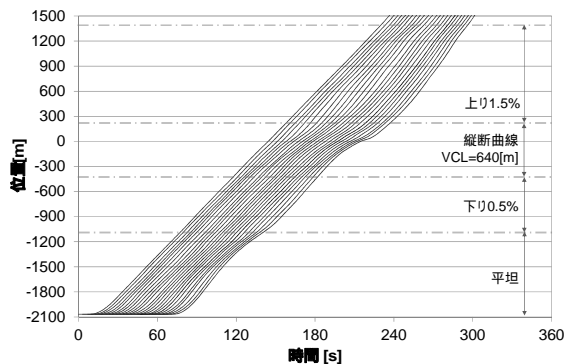


図-1 被験者 B-02 の緩サグにおける追従積重ね試験 Time-space 図

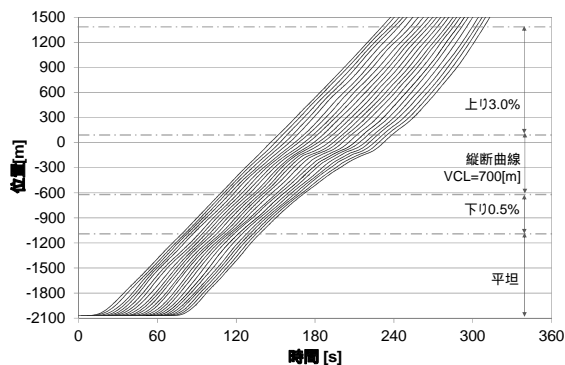


図-2 被験者 B-02 の急サグにおける追従積重ね試験 Time-space 図

##### (2) 雰囲気依存交通流モデルの推定

この実験結果を用いて、雰囲気依存交通流モデルを構築してみよう。相互作用の仮定の方法は無数にあり得るが以下を試行する。

前後隣接車両および時間経過方向の相互作用を仮定したモデル：本研究課題着手直前に筆者が提案した「前後の車両間で車頭時間が相互に影響を及ぼし合う。その際、車頭時間が揃う方が安定な交通流である」との作用を基本に、「時間経過方向に車頭時間が滑らかに変動する」との仮定と、「隣り合う車の車頭時間は滑らかに変化する」との仮定に基づいたモデルへのあてはめを行なう。紙面の都合上詳細は割愛するが、マルコフ連鎖モンテカルロ法の適用によって相互作用の強さとして推定されるハイパーパラメータ値を見る限り、時間経過方向への滑らかさが卓越し、隣り合う車同士の滑らかさはそれと比較して小さいことが判明する。ただし、モンテカルロ計算の収束の遅さも課題として残され、他の推定方法との比較検討も必要と判断される。

階層ベイズ型の季節調整法の適用：事前分布およびデータ分布が正規型である場合に最小二乗法の適用が可能である。ここでは、階層ベイズ型季節調整法を適用するため図-3のようにデータをセットする。すなわち、前後に隣りあう車両の車頭時間は滑らかでありトレンド成分とみなせる、ある車両の時間経過方向の車頭時間は大きく変化しない（季節変動成分の周期内平均は0）みなす。この3種類の事前の仮定が階層ベイズにおける超事前分布とみなし、それぞれの強さを追従積重ね試験データによって推定されることになる。

推定結果の1例を図-4および図-5に示そう。それぞれ、被験者 B-02 の緩サグおよび急サグでの試験結果を図-3に示すようなデータフォーマットに変換し、最小二乗推定（厳密にはハイパーパラメータを未知とした第II種の最尤法を適用）したものである。ハイパーパラメータは図のキャプションに示した通りであり、それぞれの値は図-3に対応して、トレンドの滑らかさ、季節変動の小ささ、時間の経過とともに季節変動成分の総和の変化の小ささを意味している。

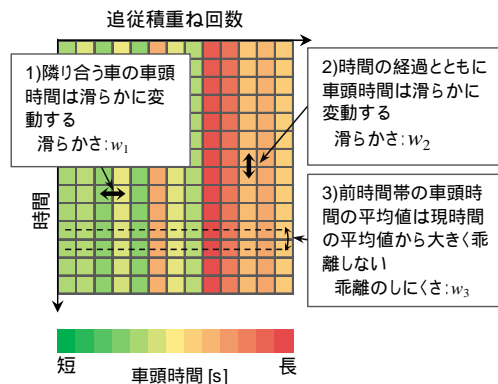


図-3 追従積重ね試験データを階層ベイズ型雰囲気依存モデルにあてはめる際のデータフォーマットと事前の知識の設定



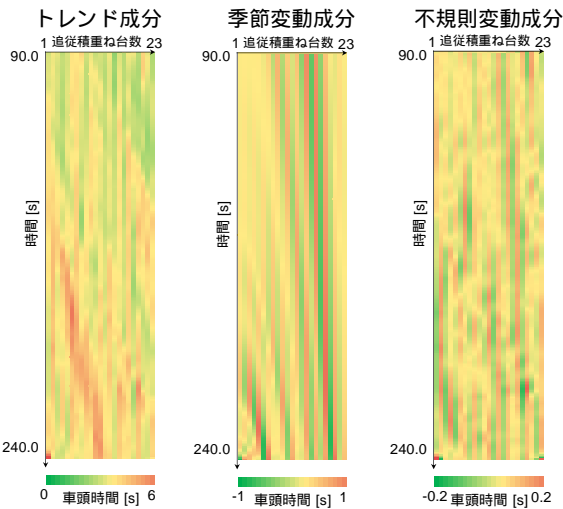


図-4 被験者B-02の緩サグにおける車頭時間データの3成分への分解(ハイパーパラメータ推定値  $\sigma_d/w_1 = 0.119$  ,  $1/w_2 = 2.53 \times 10^2$  ,  $1/w_3 = 8.37 \times 10^2$  )

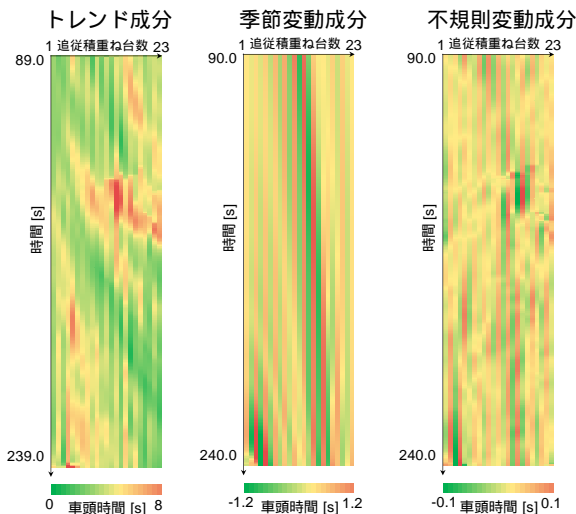


図-5 被験者B-02の急サグにおける車頭時間データの3成分への分解(ハイパーパラメータ推定値  $\sigma_d/w_1 = 7.13 \times 10^{-2}$  ,  $1/w_2 = 2.69 \times 10^2$  ,  $1/w_3 = 4.21 \times 10^3$  )

適用の結果、これらハイパーパラメータ推定値からみて時間経過方向すなわち季節変動成分(とみなす方向)が支配的であることがわかる。ただし、サグ間の相違は明確ではない。しかしながら、このような推定技術を導入したことで、近い将来平坦路との比較によってサグ特有の相互作用の強さの推定、サグ間の比較によってボトルネックとなるサグ、そうでないサグの炙り出しに繋がるものと考えられる。

(3) 渋滞先頭直上における雰囲気依存実験

隣接車線の速度変動パターンとの類似性を判断するための相関係数の算出、既往追従モデルへのあてはめなど、いくつかの分析を

行なう。結果として、最も簡単な方法ではあるが、以下のような被験者の分類が、取得された実験データの範囲においては可能であることが見出される。「隣接車線の車(ペースカー)の動きに依存し、かつ、先行車に依存する被験者」、「隣接車線の車両には影響を受けないが(相関係数が小さい等)、先行車には追従する被験者」、「隣接車線の車の動きに依存せず先行車へも追従しない被験者」、の3種類に分類される(図-6)。全員が仮説通りの挙動をしない事実は、当初想定とは異なるものである。これが周囲の「雰囲気」へ感度が低いためのなのか、単にDS実験における特性によるものかは现阶段では不明である。

素直に考えれば、当初想定通りでない被験者と同様の運転をするドライバーの混入が渋滞発生後の捌け交通量を低いままにしてしまう主因であり得る。このようなドライバーにはLEDペースメーカーや速度回復表示板には効かないことを暗に示しており、車載器等によって運転者個別の追従特性に合わせ、かつ時々刻々とアドバイスする補助が必要であることも意味している。

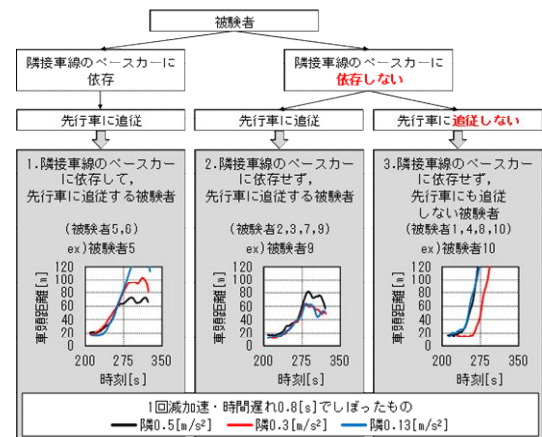


図-6 渋滞先頭位置での渋滞終了を演出するペースカーへの反応の違いによる運転者の3類型

(4) 本研究の成果のまとめ

雰囲気依存型交通流モデルを構築し、今後の単路部ボトルネック現象の研究に際して新たな切り口となるモデルを提案した。具体的には、車頭時間が前後の隣接車両等と相互作用すると仮定したモデルであり、マイクロ型の追従モデルと、マクロ型の流体モデルのいわば中間のスケールとしてモデル化された交通流モデルである。上記のモデルの妥当性、詳細な構造の推定のために、ドライビングシミュレータ(DS)を用いて、DSの特性を活かした「追従積重ね試験」を実施し、縦断勾配と交通流との関係のみ議論するのに適したデータを取得した。

上記のために、いくつかのモデルフィッティングを試行した。第1に、素朴な相互作用を仮定し、マルコフ連鎖モンテカルロ法

を適用する方法の実装である。第2に、事前分布の設定の妥当性も含めたモデル優劣比較を行なえるような統計量 (ABIC) が求めやすい、事前分布およびデータ分布のいずれもが正規分布である場合に適用できる最小二乗法にて推定する方法を実装した。これは階層ベイズ形式で記述される季節調整法の問題と同様となり、被験者毎および実験コース毎に異なる相互作用の強さを、トレンド成分、季節調整成分の強さに置換して考えられることを示した。

渋滞先頭位置での緩慢な追従を防止するための施策として、隣接車線の車両が大きな加速度で増速していくペースカーの混入を想定し、その効果を検証した。実験の範囲では全ての被験者について追従が促されるわけではなく仮説通りではなかったが、少なくとも3類型に分類される：隣接車線の加速に促され先行車に追従するドライバー、先行者へは追従しないが隣接車線の動きに引きずられるドライバー、先行車にも隣接車線にも影響を受けないドライバー、である。

(5) むすび：以上は、ボトルネック現象に対する理解を追従挙動のモデル化以外によって図ろうとするものであり、類似の取組みがない中での試行であったため、課題も多く浮かび上がっている。例えば、結局のところボトルネックとなるサグ、そうでないサグを決定的に炙り出すことまでは到達していないし、またそのボトルネック容量を推定することも现阶段では難しい。しかしながら、技術要素としての、DS の活用や、前後に隣り合う車両間の車頭時間の交換相互作用を仮定する見方の提案と、その妥当性を検証するための階層ベイズ法の適用など、上述の課題に解答するための環境は十分に整備されたと考えられる。また、渋滞発生後の渋滞先頭における雰囲気依存性についての知見も、渋滞発生時の雰囲気依存交通流モデルの改良に繋がるはずであり、例えば車頭時間相互作用が「切れる」追従車両対が発生する確率等として取り入れることも可能であろう。さらには、相互作用の形式として Ising スピン等を想定すれば、臨界現象を伴う集合現象を生じさせるモデルとしても記述できるが、渋滞発生時のボトルネック直上での現象はまさに臨界現象として解釈するべきかもしれないとの考えも想起されるところであり検討に値する。これら今後の方針は本課題の成果がなければ決して見いだせなかったと思われる、この点が最大の貢献と言えよう。

#### <引用文献>

越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，No.371/IV-5，pp.1-7，1986。  
葛西誠，内山久雄，野中康弘：スパイラル曲線として表現される車両追従挙動のモデル化，土木学会論文集 D，Vol.63，No.1，pp.65-75，2007。

Makoto KASAI: Car-Following Model with Multiple Predicting and Controlling Modules Based on Assumptions of Anticipation Behavior, *Proceedings of the 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Vol.15, pp.769-775, 2012.

西森秀稔:相転移・臨界現象の統計物理学，培風館，2005。

大口敬:高速道路における交通渋滞緩和策の最新動向，自動車技術，Vol.67，No.10，pp.11-16，2013。

大口敬，飯田克弘：高速道路サグにおける追従挙動特性におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性，交通工学，Vol.38，No.4，pp.41-50，2003。

石黒真木夫，松本隆，乾敏郎，田邊國士:統計科学のフロンティア 4 階層ベイズモデルとその周辺，岩波書店，2004。

伊庭幸人，種村正美，大森裕浩，和合肇，佐藤整尚，高橋明彦:統計科学のフロンティア 12 計算統計 II，岩波書店，2005。

Makoto KASAI: Exchange Interaction in the Time Headway Model in Critical Traffic Flow States, *Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, pp.1587-1593, 2013.

Akaike, H.: Likelihood and the Bayes procedure, *Trabajos de Estadística Y de Investigación Operativa*, Vol.31, pp. 143-166, 1980.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Makoto KASAI, Shun SHIBAGAKI and Shintaro TERABE: Extracting Characteristics of Traffic Flow in Bottlenecks with Exchange Interactions in Time Headway, *Proceedings of the 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.3144-3150, 2014.10. (査読有)  
DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958196

[学会発表](計2件)

葛西誠，大月崇照，寺部慎太郎: 単路部交通流の特性を抽出するための車頭時間ダイナミクスモデル，土木計画学研究・講演集，Vol.50，6pages，2014.11.3 (鳥取大学)  
柴垣俊，葛西誠，伏屋和晃，寺部慎太郎: ドライビングシミュレータを用いた追従積重ね試験データから交通流の特徴を抽出する手法，土木計画学研究・講演集，Vol.48，6pages，2013.11.2(大阪市立大学)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛西 誠 (KASAI, Makoto)  
東京理科大学理工学部・助教  
研究者番号：20579792