

単路部ボトルネック現象の理解のための交通流モデル論

大月 崇照¹・葛西 誠²・山路 健太³・寺部 慎太郎⁴

¹非会員 (株)エイト日本技術開発 国土インフラ事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: otsuki-ta@ej-hds.co.jp

²正会員 (株)高速道路総合技術研究所 交通環境研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail: kasai@ri-nexco.co.jp

³非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: 7612120@ed.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: terabe@rs.noda.tus.ac.jp

高速道路単路部における容量上の隘路現象を説明する取組みは、主として追従挙動のモデル化に依ってきた。しかし隘路となるサグとそうでないサグの見分けが現状でも困難であることを鑑みると、臨界流状態から渋滞に至るプロセスを正しく理解できていない可能性がある。本稿では、交通工学分野の研究のみならず物理学をバックグラウンドとする研究等を分野横断的に俯瞰し、隘路現象の本質に迫るための論点をいくつか提示する。より具体的には、集合現象として理解することの可能性を議論し、具体のモデル化の方針として、磁性体の相転移・臨界現象のアナロジーでの隘路現象の理解、サービス率の変動する直列窓口待ち行列の適用があり得ることに触れる。

Key Words : *capacity bottleneck, traffic flow, modeling critical phenomena*

1. はじめに

道路を賢く使う取組¹⁾が謳われる昨今、道路交通サービスの向上を即効性のある施策によって実現させることが求められている。このことは、ETC2.0プローブデータ等を活用した問題箇所の把握(すなわち容量上のボトルネック箇所の把握)がピンポイントで行なえることも動機となっている。

このような施策としては動的料金による経路誘導²⁾や、交通流円滑化による容量向上³⁾、例えば路肩を活用した付加車線設置⁴⁾といったハード対策、ペースメーカーライト⁵⁾あるいはエスコートライト⁶⁾、Adaptive Cruise Control (ACC)の普及³⁾といった車側からのほたらきかけがあり得る。しかしながら、これらはいわば病因のわからない状態における経験的な対症療法とみなすべきものであり、本質的には病態の理解、すなわち「ある道路線形を有する区間なぜ容量がそのようになるか」の追求をおろそかにしては、将来的に真に効果的な円滑化施策を立案する

ことは難しいものと考えられる。

もちろん現実的には、容量向上への取組みは短期間に実現できるものとは限らずかつ小さくない費用を伴うから、当面の改善策としての対症療法であったとしても、より効果のある療法へと高度化されて良い。例えば、交通管理の高度化による渋滞を抑止あるいは緩和が該当する。所要時間情報の精度向上や、さらには所要時間の「予測」情報を(法律上の制約を考慮する必要はあるものの)提供することによって、利用者への経路変更や出発時刻変更等を促すことがそれであろう。このためには、車両感知器による交通状態推定⁸⁾やプローブデータによる交通状態推定¹⁰⁾、あるいはそれらの融合による交通状態推定¹¹⁾が適用可能性の高かつ効果のある方法と位置づけられる。ただし、これら交通状態推定においても、基本図(Fundamental diagram)の仮定、特に交通容量の設定と交通流の駆動部分のモデリングが推定精度を左右するため、精度向上を目指すならば、いずれは交通容量の規定要因や交通流のモデリングに踏み込まざるを得ない

ことには変わらない。

本稿は、上記のような問題意識の下、特に単路の容量上のボトルネック現象（以下、紛らわしくない限り単にボトルネック現象とする）を理解することを狙いとして、交通流現象をどのようにモデル化すべきかを著者らの見解に基づいて整理し、議論のきっかけとして寄与することを狙っている。

2. 交通流現象に関する分野横断的な理解と課題

(1) モデル化の系譜

a) 容量上のボトルネック現象が知られるまで

交通流のモデリングは1950年代に始まり、有名なものとしては、Lighthill & Whitham¹²⁾に始まるマクロ的な流体モデル、Pipes¹³⁾、Chandler *et al.*¹⁴⁾、Gazis *et al.*^{15),16)}（通称GMモデル）に代表されるようなミクロ的な挙動モデルが挙げられる。いずれもこれらは交通流そのものの性質を調べるのが主眼であったとされる。

単路部におけるボトルネック現象が知られるようになったのは1980年前後¹⁷⁾とされているが、この時期の研究を牽引したのは越¹⁷⁾である。それまでに提案されたミクロ追従挙動モデルでは、自由流から自発的に渋滞流へ変化するものを表現可能なモデルが見当たらないことを述べ（同様の指摘は只木ら¹⁸⁾によってもなされている）、Gazis *et al.*^{15),16)}のモデルを基本に縦断線形の影響を受けるロジックを提案し、また自由流と渋滞流において希望速度項の影響の有無が変わることなどを仮定し、ボトルネック現象を説明するための追従挙動モデルを提案した。このモデルはXing・越¹⁹⁾によって実データを元に妥当性の検証が行なわれ、またOzaki²⁰⁾、尾崎²¹⁾によって改良がされた。ただし、こうした改良の過程で多くのパラメータをモデルが抱えることにもなった。パラメータの多さは一般にオーバーフィッティングの問題をもたらし、追従挙動モデルについても同様の問題を生じる可能性が指摘されている²²⁾¹⁾。

上述のモデルを含めて、2000年前後までのマクロ交通流モデル（流体モデル）の系譜は中辻⁹⁾に、また追従挙動モデルについては大口²³⁾およびBrackstone & McDonald²⁴⁾に詳しくまとめられている。

b) 1990年代以降の学際化

一方で、1990年代中頃になると、統計物理学等をバックグラウンドとしてもつ研究グループの参入が盛んになり、Optimal Velocity (OV) Model²⁵⁾やIntelligent Driver Model (IDM)²⁶⁾といった、数理的洞察に基づいた簡素でわかりやすいモデルも提案されるようになった²⁾（なお、彼らの表現では「最小モデル」という言い方をする。現象の

骨格を表すのに必要最小限のパラメータのみを持たせたモデルをこのように言う）。

これらのモデルは、1950～1970年代頃の初期の交通流モデルが自由流と渋滞流とを一貫して説明できなかったことを克服したものとなっているとされる²⁷⁾。GMモデル等では、周辺の交通密度に依存した項が入っておらず、自由流と渋滞流の2相あり得ることは原理的に表現できないが、OVモデル²⁵⁾では、車間距離（ \propto 密度の逆数）に応じた最適な速度で走行するロジックが入っているため、密度依存性を考慮したモデル、というわけである。このモデルが「自由流」と「渋滞流」間の相転移を表現しうるものであるかの検証には、周期境界条件（周期系という）を課した円環状の単路において、初期密度を与件としている。これの類似の研究も、モデルの特性を調べるのに周期系を仮定するものは多い（例えば増淵・荒井²⁸⁾）。しかしながら、周期系の場合、車の出入りはないので初期密度に依存して、自由流か渋滞流か定まってしまうはずである。このような周期系であれば、越モデルもその改良版に相当する尾崎モデル^{20),21)}でも、車間距離に依存する項が入っているため、自由流と渋滞流の2相に分離することは表現できるものと推測される。

交通工学上の要請に立ち返れば、「容量上のボトルネックがなぜ生じるか」「どこが容量上のボトルネックとなるか」「容量はどの程度になるか」であって、これを説明できる仮説の追求であろう。全てのサグやトンネルが容量上のボトルネックとはならないことを見ても、それは明らかと思われる。

(2) 周期系か開放系か

その意味で、開放系であることは、容量上のボトルネックの生じる原因を考える上では本質的と考えられる。換言すれば「容量を所与とせず」、交通流内部から、容量が定まる理由を探ることが問題の本質である（実際の単路が開放系であり、周期系では見られない興味深い現象があることは杉山²⁷⁾も指摘している。ただしこれは本質ではなく、「味付け」としての位置付けとみなしているようである¹⁾）。周期系では、空間的に均一な構造を仮定しているのと同義であるので、ある区間（あるいは断面）の容量が周囲より小さくなり、その容量最小の断面がある地点に固定される、という構造は基本的には自発的に生じないからである（そのような空間的な非均一性を生み出す構造を再現するのであれば、空間に均一な構造である周期系を議論に持ち込む動機がない）。

また、周期系にて性質を調べることが、現実の現象と食い違う可能性があることの事例としては、「準安定状態^{27),28)}」に関する解釈がある¹⁴⁾。

容量を所与とせず、容量が下がることをシミュレーション

ョンにて示した例が杉山²⁷⁾である。ただし、ここでは OV モデルのスケールが全体的に小さくなる、という仮定を置いている。この仮定の根拠としては、トンネルを例にして、「トンネル内では少し速度を落とすと思われる」からであるとの記述²⁷⁾がある。確かに、越の指摘¹⁷⁾のように、トンネル内は、速度と車頭距離の関係が少し違うとされているので、この設定はある程度妥当とも思われる。しかし、全てのサグやトンネルがこの仮説に従うとも考えられず、かつてボトルネックであった東名上り秦野サグのように下り坂からほとんど平坦の下りのサグ^{17),19)}では、速度が落ちるとい設定それ自体が正しいかは自明ではない。

なお、どこが容量上のボトルネックとなるかを明らかにするには、「交通流モデル」を用いずとも統計モデリングによる方法ももちろんあり得る。例えば、顕在化ボトルネックに対して渋滞発生時交通容量を道路線形等から説明させる研究、またこの結果を元に潜在ボトルネックの位置および容量を推定できるようになるかを検証した研究²⁹⁾がある。ただし、どうしてそのような統計モデルが成立し得るのかを説明する仮説までは統計モデルそのものが示してくれるわけではなく、この結果を踏まえた考察は求められるであろう。

(3) 要請

すなわち、容量上のボトルネック現象を表現するモデルへの要請をまとめると以下ようになる。1)開放系であること、2)容量が小さい断面（すなわちボトルネック）が自然発生し、それがあある地点に留まり続けること、である。

この要請のもと、いくつかモデル化の方針を以下に考えることとする。

3. フィードバック系の可能性

あるボトルネックがボトルネックとして存在するためには、フィードバックがかかる大きさと、フィードバックがどの程度遠い地点までかかるか、が本質と考えられる。なぜそう言えるのか、直観的で簡単な議論だが、以下に考えを整理してみたいと思う。

以下、交通量、交通流率の用語は紛らわしいので、ボトルネック上流から供給される「需要」で統一することとする。

(1) 需要が小さいとき

自由流であれば、下流からある状態量（車頭時間、など交通流に係る状態量）が移流してくる。すなわち、下

流で観測される状態量の時系列は、上流において時間遅れを伴った相関を持つ時系列として観測される、とみなすことができるであろう。ここでは需要が小さい場合を考えているので、ボトルネックとなりうる付近でも、上流における状態量の時系列が、時間遅れを伴ってある程度の相関を持ったままボトルネックを通過していき、それ以上のことは起こらないと考えられる。

(2) 需要が容量に近づいてきたとき

臨界流程度の密度になると、容量上のボトルネックとなりうる付近（例えばサグ等）で車頭時間の微小擾乱が生じ、さらには比較的大きな減速波が生じるようになる。基本的にはこれらは上流に伝播する。すなわち、ボトルネックでの状態量の時系列が、上流でも時間遅れを伴って相関を持つ時系列として観測される、と考えることができる。

下流へは、減速波を受けた影響で、速度が遅い状態がある程度引きずったまま移流するが、十分な距離を走行するうちに、その影響は消えるであろう。すなわち、ボトルネックでの状態量は、下流のある程度の距離までは時間遅れを伴って相関を持つものの、距離が長くなるほど減衰すると思われる。

(3) 渋滞発生後

減速波（車頭時間増大波）の上流増幅伝播が生じ、さらに上流から大きな車群が到着すると、後続の車両が全て追従状態となるから減速波は途切れることなく上流へ伝播していくとされる¹⁷⁾。したがって、渋滞列中の状態量の時系列は、下流に存在するボトルネックの状態量と時間遅れを伴った相関を持つ時系列である。一方で、交通流の媒体としての車は下流へ移流していくから、上流の交通流の状態量は、下流で時間遅れを伴った相関を持つ時系列として観測されると考えられる。

すなわち、ボトルネックと、ボトルネックの上流との間にフィードバックがかかり続ける、と推論することができる。

このように考えていくと、移流速度とフィードバックの速さのバランスで規定されるように思われる。順調な移流を阻む減速波の発生頻度（上流への伝播を生じさせる要素）と、その伝播速度よりも速く下流へ押し流そうとする2つの要素のバランスで決まっている、という理解である。

(4) 定着現象との関係

野中ら³⁰⁾によって唱えられた「定着」という現象がある。例えば普段渋滞を引き起こさないような容量上のボトルネックとならない区間で、交通事故などの何らかの

障害によって容量が下がり、そこを先頭として渋滞列が形成されることがある。渋滞列が、普段渋滞するような容量上のボトルネックまで延伸した後に、下流の障害が取り除かれると、障害を先頭とした渋滞列の先頭は上流へ移動し始める（信号交差点における発進波と同様である）。ところが、普段渋滞する容量上のボトルネックまで発進波が伝播すると、この容量上のボトルネックに渋滞列が留まってしまい、それ以上上流へは伝播しなくなる。これが「定着」と呼ばれる現象³⁰⁾³¹⁾である（大口・中村³²⁾、大口の解説³³⁾にも紹介がある）。

自然渋滞において渋滞先頭がサグに留まって安定する仮説は越¹⁷⁾によって既になされているが、定着の際にもこれと同じ現象が生じていると考えてよさそうである。越の仮説¹⁷⁾を引用しておく、何らかの理由で渋滞列が前進すると（下流側に移動すると）、サグに渋滞流領域がかかることになり、減速波とその下流側に加速波が発生して、それ以上渋滞列の下流への移動を阻む。逆に、上流側に移動すると、自由流状態の交通流がサグに差し掛かることになり、やはり減速波が生じて渋滞先頭のそれ以上の上流遷移を防ぐ、とある。定着する断面では、おそらく上流へ渋滞先頭が遷移しようとする、減速波が生じてそれ以上の上流遷移を防ぐのであろうと考えられる。

すなわち、容量上のボトルネック付近で渋滞が発生するのかその下流の突発事象によって発生するのかにかかわらず、下流側の交通流の状態量が、上流側の交通流の状態量と時間遅れを伴った相関を持つ構造が一旦出現すれば、ボトルネック地点とその上流との間でフィードバックがかかり続ける構造が生じるのであろうと考えられる。

上記のような、フィードバック系をあらわす最小モデルとして、どのようなものがあり得るか、以下にアイデアだけではあるが簡単に紹介しておく⁹⁾。

4. モデルへのノイズ印加の可能性

(1) 臨界現象・相転移現象を生じるモデルの援用

OVモデル²⁵⁾を元に、速度にノイズが加わると仮定するのが、只木ら¹⁸⁾である。ノイズの印加が、空間的な容量の非均一性をどのように生み出すかは自明な問題ではない。加わるノイズの大きさが、追従車の加速そのものと移流の2つの要素で伝播の様子が変わってくるからである。したがって、容量を所与として外部から与えていることにはなっていないため、本質をついたモデル化になっている可能性がある。

Kasai³⁴⁾のモデルも、実はこの種のノイズ印加モデルの

一種であったと考えられる。自由流から渋滞流への転移は相転移・臨界現象の類推で語られることがあるが、そうであるならば、相転移・臨界現象を表現することが予め知られているモデルによって交通流を表現できるはずではないか、というのがここでの主張であった。

磁性体の相転移、水と氷の相転移現象を研究するためのモデルとしてIsingモデルやXYモデル等がある³⁵⁾。これらの構造を参考に、「車頭時間を、前後に隣り合う車同士で交換しあう」と仮定したモデルを提案した。数値実験の結果、車頭時間の擾乱を生成することが確認されている。ただし、この検証は純粋な開放系で行なったわけではないので、その点は追加の検証が必要である。

もう1つの課題は、相互作用の非対称性についてどう捉えるかである。Kasai³⁴⁾の場合は、相互作用は異方性を持たないと仮定しており、ある車両の車頭時間は、後方車両に影響を及ぼすのみならず前方車両にも影響を及ぼす構造となっている。これで十分良い近似となっているのか、あるいは後方にしか影を及ぼさないと仮定すべきなのか、検討が必要である。

(2) 直列待ち行列系での表現³⁶⁾

直列に窓口が並ぶ待ち行列を考える。サービス率自体は変動を許すものとする。ただし、各窓口のサービス率の「平均」は固定値とする。サービス率の変動は、例えば白色雑音に従うと仮定することが考えられる。このような系は、サービス率変動型直列窓口と呼ぶことができそうである。

サービス率の平均は固定値なので、各断面におけるサービス率の期待値としてはどの断面も同一と考えられる。開放系を考え、無限に窓口が連なっている系を考える。それらのうち、いくつか隣り合う窓口のサービス率が変動し、それ以外の（上下流の）窓口のサービス率は固定であると考えられる。

さらに、上記の開放系のある区間において、サービス率が相関を持つ場合を考える。この場合、どの範囲まで相関が及ぶかを考えることによって、第3章で述べたようなフィードバック系が表現できるものと考えられる。この相関の強さ、サービス率の変動の大きさが主たるパラメータとなるであろう。筆者らはいくつかの数値実験を試みており、試行錯誤的に実路にて観測される定性的な性質を表現する場合もあることがわかっているが、まとまった形での報告は機会を改めてしたい。

なお、待ち行列系において、複数の直列窓口待ち行列系の場合でも、到着分布にポアソン分布、サービス率も指数分布を仮定する場合は解析が簡単になるが、そうでない場合は解析的に解を求めるのが極めて難しくなることが知られている。ここで仮定するような系もそのよう

な解析的には性質がわからないであろうから、シミュレーション等の助けを借りることとなりそうである。

なお、サービス率が需要と相関を持つ系についてはいくつかの研究事例があるようであるが、そのままここで議論に参考になるような研究は筆者らの知る限りまだない。

5. おわりに

本稿は、分野横断的にボトルネック現象に係る研究を俯瞰し、今後取り組むべき方向性の案を述べたものである。ここでの整理によれば、交通工学系の研究と、それ以外の分野では必ずしも問題の本質が同一と考えられていない様子が伺える。現段階では試案でしかないが、様々な分野での論点を吟味すると、一種のフィードバック系としてボトルネック現象が記述できる可能性があることを述べた。

上記の整理にあたっては、筆者らが交通工学出身である以上、これまでの交通工学に携わってきた方々の経験知に基づく要素も暗黙のうちに仮定している可能性がある。ボトルネック現象にかかわる分野横断的な連携が決して緊密なものとはいえなかった理由のひとつは、文献として発表された内容だけではボトルネック現象の本質が共有されきれず、暗黙知の共有が十分になされなかったことにも因るのではと思われる。このような情報交換の機会を持つことも重要であろう。

本稿で述べていること1つ1つは新規性を持つものとは思っていないが、物理の視点も借りながら横断的に現象を整理してみたことに価値があるものと認識している。ここでのアイデアは今後実証を待たなければならないところが多いが、議論の素材として筆者らの意見をまとめてみた。読者の意見を待ちたい。

付録

- [1] 構造が直観的にわかりにくく、細部に左右されない現象の本質をあらわす「模型」としての役割は担っていないかもしれない。いわゆるプラントなどの制御を目的に作られるモデルとしての役割のほうが強いかもしれない。もちろんモデル化の思想に関することなので、場面や分析者に応じてモデルの用い方が異なることが想定されるため、付録においた。
- [2] これらはやはり「交通流の普遍的な性質」としての自由流と渋滞流の転移を研究するためのモデルであって、ボトルネック現象に焦点を置いてはいないようである。とはいえ、道具があればそれを

利用したくなるものであろう、応用上の要請で、これらのモデルを拡張する形でボトルネック現象のモデル化と渋滞緩和施策の立案を狙いとする研究事例も見られるようになった。例えばGoni Ros *et al.*³⁷⁾である。もしかすると、これらは当初想定されたモデルの適用範囲を逸脱しているかもしれない。

- [3] 杉山の指摘の原文は、「現実の道路は開放系であり、トンネル・サグなどのボトルネックが存在し～（略）～これらの付加的な要因が加わると、周期系で見た基本的性格に更に興味ある現象が加わる」とある。すなわち、容量上のボトルネック現象において開放系であることは「本質的ではない」とみている。容量上のボトルネックを設けるために（容量の制約を与えるために）、「OV関数全体をスケールダウンしている」とある。これ仮定自体が、合理的なものであるかどうか、議論される必要があると考えられる。
- [4] 蛇足ではあるが、基本図（Fundamental diagram）に「準安定状態（Meta-stable state）」が現れることが本質的とみなされている傾向がある。ただし、この議論の元になっているFundamental diagram がどのように作成されたか気をつける必要がある。開放系であって、車両感知器が容量上のボトルネックより上流に位置している場合、下流側のボトルネックで渋滞が始まるまでは当該車両感知器では高い流率を観測するはずである。下流側ボトルネックで渋滞が始まると、ここでの捌け交通量よりも大きな流率を観測する断面は存在しないので、車両感知器設置断面で観測される流率もボトルネックの捌け交通量と等しくなるはずである。このように考えれば、ボトルネックで渋滞が発生する直前に観測された高い交通流率の部分が飛び出ているように見え、これが準安定状態に見えるだろう。
- [5] 系の大きさも、議論が必要かもしれない。交通流は、その構成要素、車、すなわち最小粒子がたかだか100～1000のオーダーでボトルネック現象を引き起こす。一方で、物理学でいうマクロスケールは、アボガドロ数個のオーダーである。ミクロを記述するルールだけでは全く非自明な臨界現象、相転移現象がマクロ系では見られることは、系のサイズが無限とって良いほど大きいからである。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP:
http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000250.html
- 2) 根本敏則, 清水哲夫, 家田仁, 羽藤英二, 田邊勝巳, 中拂論, 味水佑毅: 首都圏三環状概成時を念頭にお

- いた料金施策と ITS 施策による非常時を含む総合的
交通マネジメント方策の実用化, 国土交通省新道路
技術会議中間報告, 2015.
<http://www.mlit.go.jp/road/tech/hyouka/h26hyouka.html>
- 3) <http://www.nilim.go.jp/lab/qcg/index.htm>
 - 4) https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/3758.html
 - 5) 遠藤元一, 中川浩, 深瀬正之, 橋本弾: 東京湾アクアラインの渋滞対策について, 交通工学論文集, Vol.1, No.4, pp.B_1-B_8, 2015.
 - 6) http://www.shutoko.co.jp/company/press/h26/data/02/12_escortlight/
 - 7) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一: 高速道路サグ部渋滞対策に資する ACC の将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.B_60-B_67, 2015.
 - 8) 鈴木宏典, 中辻隆: フィードバック原理に基づく交通状態推定手法を応用した高速道路上起終点旅行時間の推定, 土木学会論文集, No.695/IV-54, pp.137-148, 2002.
 - 9) 中辻隆: 交通流におけるフィードバック原理に基づく推定技術の現状と展望, IATSS Review, Vol.31, No.1, pp.15-23, 2006.
 - 10) 堀口良太, 桑原雅夫: 交通流変分理論の最適化問題への緩和によるプローブ車両データからの交通状態推定に関する基礎的考察, 交通工学論文集, Vol.2, No. 2, pp.A_37-A_44, 2016.
 - 11) 桑原雅夫, 大畑長, 瀧川翼, 阿部公一, 今井武: プローブデータと車両感知器データを融合活用した都市間高速道路における交通状態の推定: 土木計画学研究・講演集, Vol.47, 6pages, 2013.
 - 12) Lighthill, M. J., and Whitham, G. B.: On Kinematic Waves: 1. Flood Movement in Ling Rivers, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol.229, pp.281-316, 1955.
 - 13) Pipes, L. A.: An Operational Analysis of Traffic Dynamics, *Journal of Applied Physics*, Vol.24, No.3, pp.274-287, 1953.
 - 14) Chandler, R. E., Herman R. and Montroll, E. W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following, *Operations Research*, Vol.6, pp.165-184, 1958.
 - 15) Gazis, D. C., Herman, R. and Potts, R. B.: Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow, *Operations Research*, Vol.7, pp.499-505, 1959.
 - 16) Gazis, D. C., Herman, R. and Rothery, R. W.: Non-linear Follow-the Leader Models of Traffic Flow, *Operations Research*, Vol.9, pp.545-567, 1961.
 - 17) 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.
 - 18) 只木進一, 菊池誠, 杉山雄規, 湯川論: 交通流の科学, 日本物理学会誌, Vol.55, No.3, pp.166-171, 2000.
 - 19) Xing, J., 越正毅: 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.45-55, 1995.
 - 20) Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the Car-following Behavior, *Proceedings of 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 349-366, 1993.
 - 21) 尾崎晴男: 車両の追従挙動とサグ部の隘路現象, 東京大学博士(工学)論文, 1994.
 - 22) van Hinsbergen, C.P.I.J., Schakelb, W.J., Knoop, V.L., van Lint J.W.C., & Hoogendoorn, S.P.: A General Framework for Calibrating and Comparing Car-following Models, *Transportmetrica A: Transport Science*, Vol.11, No.5, pp.420-440, 2015.
 - 23) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.39-51, 2000.
 - 24) Brackstone, M. and McDonald, M.: Car-following: a Historical Review. *Transportation Research Part F*, Vol.2, pp.181-196, 1999.
 - 25) Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.: Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation, *Physical Review E*, Vol.51, pp.1035-1042, 1995.
 - 26) Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing D.: Congested Traffic States in Empirical Observations and Micro-scale Simulations, *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 1805-1824, 2000.
 - 27) 杉山雄規: 交通流の物理, ながれ, Vol.22, pp.95-108, 2003.
 - 28) 増淵達也, 荒井幸代: 前方情報を考慮した走行ルールによるメタ安定相の発生と特徴の解析, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J92-D, No.11, pp.1935-1944, 2009.
 - 29) Xing, J., 宇佐見純二, 福島賢一, 佐藤久長: 潜在的ボトルネック交通容量の推定及び交通容量の確率分布を用いた年間の渋滞予測検討, 土木計画学研究・論文集, Vo.27, No.5, pp.973-981, 2010.
 - 30) 野中康弘, 石田貴志, 内山久雄: 都市間高速道路単路部における渋滞定着要因に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, Vol.26, 2002.
 - 31) 村重至康, 野中康弘, 大口敬: インシデント渋滞解消後における渋滞先頭遡上および定着現象に関する研究, 第 30 回交通工学研究発表会論文集(研究論文), pp.5-8, 2010.
 - 32) 大口敬, 中村英樹: 日本における交通容量・サービスの質に関する研究の概観と展望, 土木学会論文集 D3, Vol. 67, No. 3, pp.217-229, 2011.
 - 33) 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.
 - 34) Kasai, M.: Exchange Interaction in the Time Headway Model in Critical Traffic Flow States, *Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.1587-1593, 2013.
 - 35) 西森秀稔: 相転移・臨界現象の統計物理学, 培風館, 2005.
 - 36) 川島幸之助, 塩田茂雄, 河西憲一, 豊泉洋, 会田雅樹: 待ち行列理論の基礎と応用, 共立出版, 2014.
 - 37) Goni Ros, B., Knoop, V. L., Shiommi, Y., Takahashi, T., van Arem, B. and Hoogendoorn S. P.: Modeling Traffic at Sags, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol.14, Issue.1, pp.64-74, 2016.

(2016.4.22受付)

ALTERNATIVE APPROACHES FOR MODELING BREAK-DOWN PHENOMENA
AT SAG SECTION

Takaaki OTSUKI, Makoto KASAI, Kenta YAMAJI and Shintaro TERABE