

都市間高速道路のサグ渋滞における ボトルネック上流の交通特性分析

松山 奈々海¹・吉岡 慶祐²・下川 澄雄³・森田 綽之⁴・堀口 良太⁵

¹学生会員 首都大学東京 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: matsuyama-nanami@ed.tmu.ac.jp

²正会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: yoshioka.keisuke@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: shimokawa.sumio@nihon-u.ac.jp

⁴フェロー会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: hi-morita@i-transportlab.jp

⁵正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0062 東京都千代田区神田小川町3-10)

E-mail: rhoriguchi@i-transportlab.jp

都市間高速道路における渋滞要因の多くはサグであることが知られており、これまでの既往研究において、サグ部における渋滞時の交通現象や容量に関する様々な分析が行われている。一方、ボトルネック上流の交通特性については十分に解明されておらず、渋滞量などの区間全体についての評価や予測を行う場合には、精度向上の余地があると考えられる。

そこで本研究では、ボトルネック上流での時空間的な交通特性について着目し分析を行った。その結果、渋滞区間中の交通密度は上流側ほど変動が大きく、さらに分合流交通が粗密の発生に影響を及ぼしていることを明らかにした。

Key Words : Bottleneck, Sag, Interchange, Traffic characteristics, Traffic congestion

1. はじめに

わが国の都市間高速道路における渋滞要因の多くは、サグによるものであることが知られている。これまでの既往研究では、サグ部における渋滞時の交通現象や交通容量に関する様々な分析が行われ、これらの知見は渋滞対策や渋滞予測などに活用されている。

しかし、既往研究の多くは渋滞のボトルネックでの交通現象に着目したものであり、ボトルネック上流での交通特性については十分に解明されていない。そのため、渋滞量などの区間全体についての評価や予測を行う場合には、精度向上の余地があると考えられる。

そこで本研究では、ボトルネック上流での時空間的な交通特性について分析し、渋滞中の交通密度の特性やそれに影響を及ぼす要因について明らかにすることを目的とする。

2. 高速道路の渋滞に関する主な既往研究

わが国では、戦後の経済成長とモータリゼーションの進展に伴い、今日にかけて高速道路の整備が急速に進み、わが国の発展に大きく貢献してきた。しかし、ボトルネックにおいては、年末年始や行楽シーズンを中心に渋滞が頻発しており、経済活動の阻害、交通事故の増加、沿道環境の悪化などをもたらし、今もなお渋滞は深刻な課題となっている。このような背景から、高速道路における交通現象や交通容量に関わる研究は、過去から現在にかけて様々に行われている。

例えば、渋滞発生時の交通現象や運転挙動に関わる研究として、越¹⁾は、高速道路で発生する渋滞の要因がサグであることを指摘し、ボトルネックとなっているサグでは、当時考えられていた可能交通容量4,000台/時(2車線合計)に対し、6割前後に過ぎない交通容量で渋滞が発生していること示した。また、渋滞中の運転者の追従

挙動について仮説を立て、渋滞発生時に見られる交通現象を説明している。その後、越²⁾は、渋滞が発生すると交通容量がさらに低下するとともに、“渋滞巻き込まれ時間”が増加するほど車頭間隔が大きくなり、発進流率が低下していくことを明らかにした。また、このような運転挙動は明るさにも影響を受けることも示した。

また大口³⁾は、渋滞を起こすサグと起こさないサグが存在することについて指摘し、勾配の変化以外にも渋滞発生を規定する道路構造要因があることを示唆している。

さらに大口⁴⁾は、渋滞に関する評価を可能とするため、高速道路の渋滞発生現象を記述できるような追従挙動モデルに関する整理と展望について述べている。その後、例えば葛西⁵⁾により、車車間の状態量をバネ質点系の運動と捉えた追従挙動モデルが提案されるなど、様々なモデルの検討が行われてきた。

一方、ボトルネックの交通容量に関する研究として、岡村⁷⁾や大口⁸⁾により、同程度の交通需要であっても渋滞が発生したりしなかったりすることが示された。その後、Xing⁹⁾によって、渋滞の発生を確率的事象と捉えた渋滞発生確率の推定が行われ、さらに稲野¹⁰⁾やXing¹¹⁾、小林¹²⁾により、複数のボトルネックについて渋滞発生確率が推定され、幾何構造等の関係についても研究が進められている。

このように、既往研究の多くは渋滞のボトルネック部での交通現象や交通容量に着目したものであり、その上流側での交通現象については十分に研究が進んでいるとは言えない。本研究は、ボトルネック上流側の交通現象に着目し、時空間的な交通特性について把握しようとするものである。

3. 対象箇所と分析方法

(1) 分析対象箇所と使用データ

本研究では、図-1に示すように、サグ渋滞の多発箇所として知られる関越自動車道上り高坂SA付近で発生する渋滞を分析対象とした。分析にあたっては、高坂サグを含む鶴ヶ島JCT付近～藤岡JCT付近の2012年1月～12月の車両感知器5分間データ（以下、感知器データ）の車線別交通量・平均速度を使用した。なお、感知器データについては、交通量データの精度を検証するため、2012年の年間交通量を各KPで比較し、断面間の交通量に異常が無いことを確認している。

また、対象区間における車両感知器の位置関係と、縦横断面線形の状況は図-2に示すとおりである。

(2) 渋滞発生状況の整理

渋滞発生状況を把握するため、感知器データを基に速

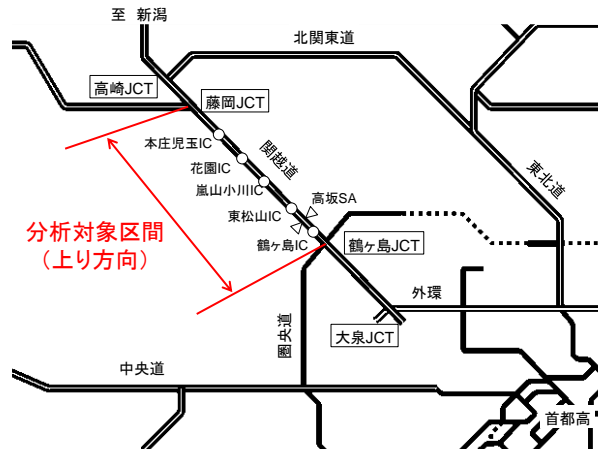


図-1 分析対象位置図

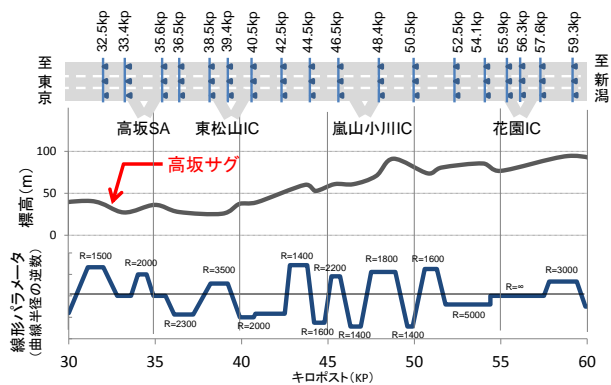


図-2 車両感知器位置関係と縦断・平面線形

表-1 渋滞発生状況整理結果表

渋滞発生状況	件数(件)
①花園ICまで延伸しない渋滞	34
②花園ICまで延伸する渋滞	27
a.渋滞末尾が花園ICに到着する前に花園ICをBNとする渋滞が発生した場合	(21)
b.花園ICをBNとする渋滞が発生しない場合	(6)
計	61

度と交通密度の時空間的な変化を色分けしてコンター図に示した例を図-3に示す。高坂サグで発生する渋滞は、図-3のように高坂サグ単独で発生する渋滞（1/9のケース）のみならず、上流の異なるボトルネックである花園ICで発生する渋滞と別々に発生するケース（10/7）や、その後一つの渋滞に合体するケース（5/20）、さらに高坂サグで発生した渋滞がそのまま花園ICを超えて延伸するケース（11/25）などに分類される。表-1は、2012年1年間の渋滞発生状況をこのような特徴別に分類したものである。

なお本研究では、渋滞の定義を「時速40km以下での低速走行が、15分以上継続した状態」とした。ここで、渋滞中に交通事故等の突発事象が明らかに発生していると判断されたものについては分析対象外とした。なお上流の花園ICにおいて渋滞が発生している際は、高坂サグの渋滞に到着する際の到着特性が通常と異なることも考えられるため、本研究ではこの点にも留意して分析を行った。

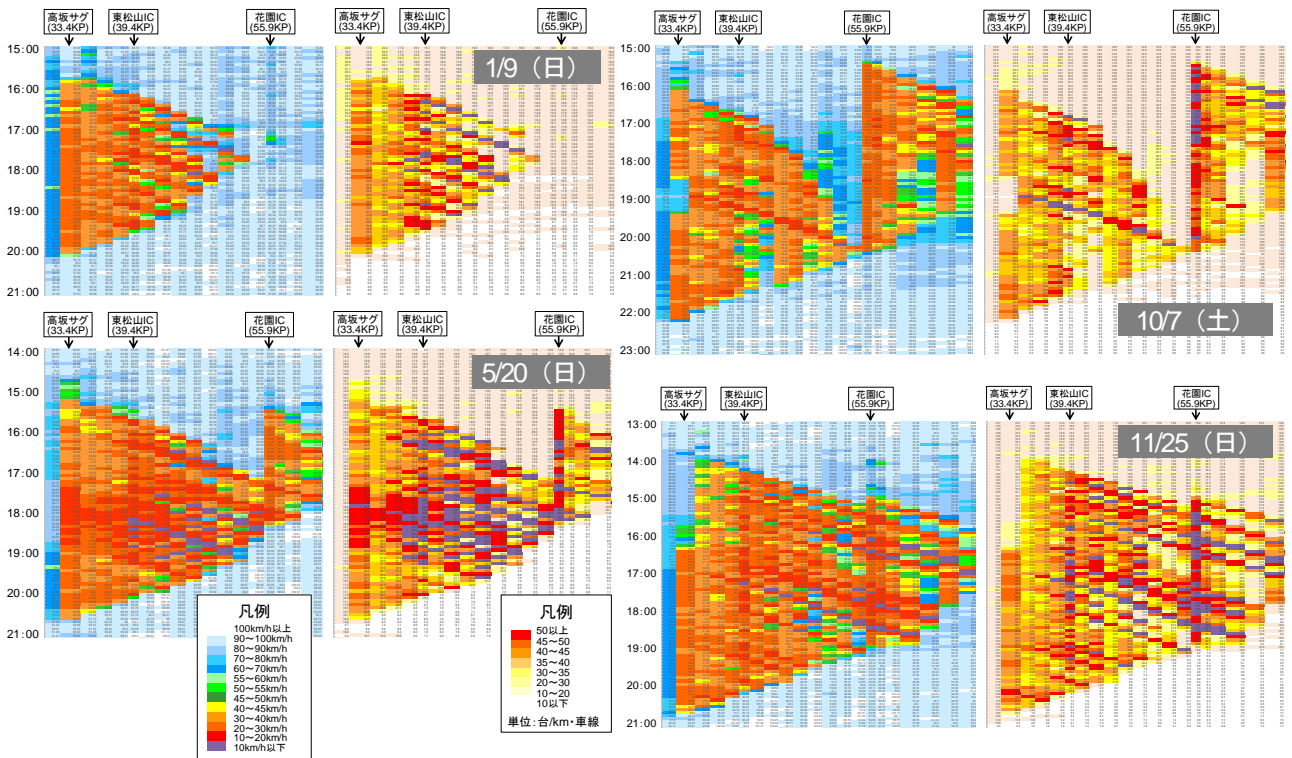


図-3 代表的な渋滞発生状況の例 (左：速度コンター図, 右：密度コンター図)

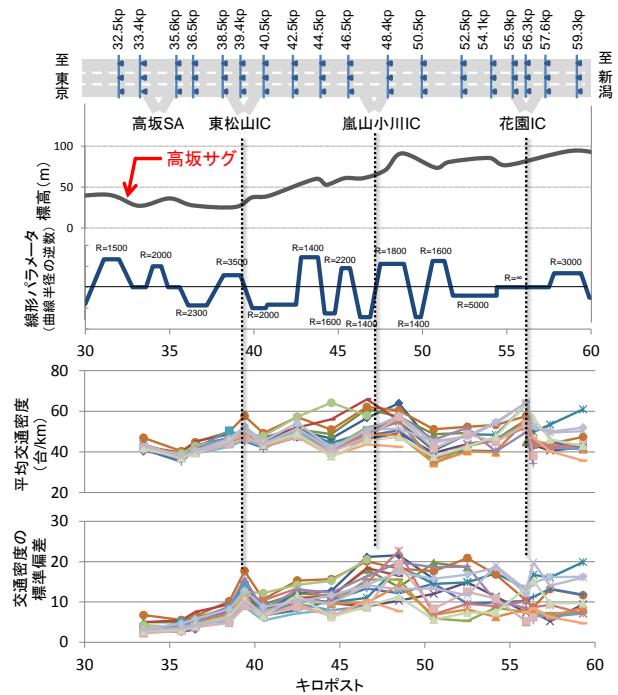
4. ボトルネック上流の交通密度特性

(1) 渋滞中の交通密度の時間変動

図-3を見ると、渋滞の上流側に向かって、速度や密度の濃淡がほぼ一定間隔に分布していることが確認できる。これは渋滞中の粗密波が上流側に伝播していることを示している。また図-4は、分析対象とした全渋滞発生日について、各キロポストにおける渋滞中の密度の平均値と標準偏差を示したものである。渋滞区間中の密度の平均値は概ね40~60台/kmで推移しているが、インター周辺や上り勾配または平面線形が厳しい箇所において、密度の平均が高い傾向にあることが分かる。このような箇所は潜在的なボトルネックであることも考えられる。また、密度の標準偏差に着目すると、東松山IC付近から上流に向かってばらつきが大きくなる傾向がある。図-3を見ても、東松山ICを境に、上流側では速度や密度の濃淡がはっきりしていることが読み取れる。この理由として、渋滞区間中の分合流交通が本線の粗密波の発生に何らかの影響を及ぼしていることが考えられる。中でも東松山ICはボトルネックに最も近いインターであり、分合流交通の影響を最も受けやすい箇所であると考えられる。

(2) 車線別の密度特性

図-5はボトルネックから上流にかけての各感知器位置における車線別の速度・密度の変化を示したものである。東松山IC合流部の直前に位置する39.4KPでは、他の箇所



※いずれも、感知器5分集計データによる
各 KP において渋滞発生時間中の平均・標準偏差を比較
30分以下の渋滞や、事故等の突発事象が発生したと思われる日は除く

図-4 各渋滞の地点別の密度特性

と比較して密度の変動が大きいとともに、車線別の密度が不均衡であることが分かる。このことから、東松山ICにおける分合流交通が本線の交通流に影響を及ぼしているものと想定され、さらに車線変更や避走が車線別の密度の不均衡を生み出すとともに、上流側への交通密度の粗密の増幅に繋がっているものと考えられる。

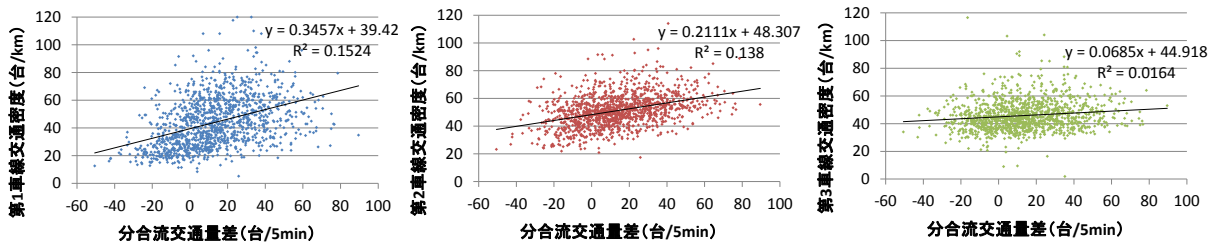


図-6 分合流交通量と車線別の密度の関係 (左：第1車線, 中央：第2車線, 右：第3車線)

5. 分合流交通が本線の交通流に与える影響

(1) 分合流交通量と車線別の密度の関係

前章で述べた、東松山ICの分合流交通が本線交通に与える影響についてさらに詳細に把握するため、渋滞発生中の分合流交通量と本線の交通密度の関係について分析した。図-6は、東松山ICにおける分合流交通量差(合流交通量-分流交通量)と、同時間帯の39.4KPにおける各車線別の交通密度の相関を見たものである。なお、分流交通量・合流交通量の算出にあたっては、図-7に示すように分合流部前後の38.5KP, 39.4KP, 40.5KPのセンサーデータから、通過時間の遅れ分を考慮したうえで交通量保存の関係から推定した。式(1)は、合流交通量算出のための関係式であり、流出交通量も同様の考え方で算出している。

$$Q_{38.5}(t) = Q_{39.4}(t) \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \left(\Delta t - \frac{L}{v(t)} \right) + Q_{39.4}(t - \Delta t) \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{L}{v(t - \Delta t)} + X(t) \quad (1)$$

なお区間中の速度は、両端センサーデータの平均速度と仮定する。

$$v(t) = \frac{v_{38.5}(t) + v_{39.4}(t)}{2}$$

ここに、 $Q(t)$ ：時刻 t の i キロポストにおけるセンサー交通量[台/5min]、 $v(t)$ ：時刻 t の i キロポストにおけるセンサー速度[km/h]、 L ：センサー間の距離(km)、 $X(t)$ ：時刻 t における流入交通量[台/5min]、 Δt ：集計時間 (=5[min]=1/12[h])である。

なお、5分間集計のセンサーデータから式(1)により推定される分合流交通量は、渋滞中の粗密波による速度変動の影響を強く受けることとなる。そこで、前後5分間で算出される分合流交通量との3点移動平均を取ることとした。

図-6によると、分流交通量に対して合流交通量が大きいくらいほど、とくに第1車線の密度が高くなる傾向にある。従って、東松山ICにおける分合流交通の大小が第1車線

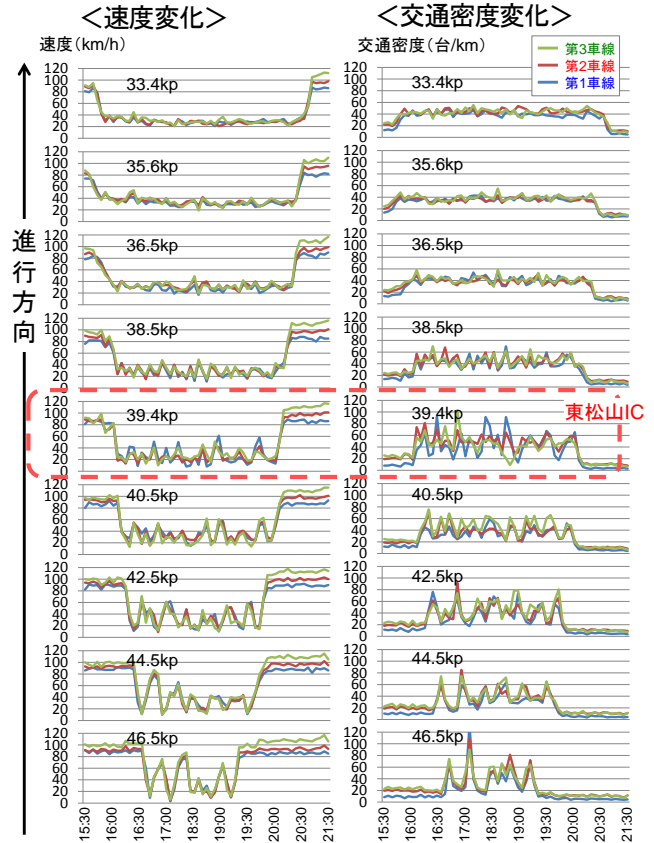


図-5 地点別・車線別の速度・密度変化

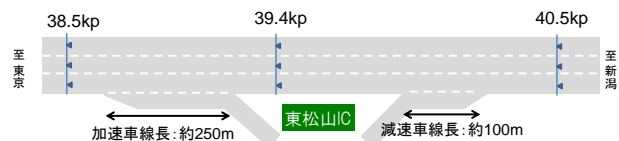


図-7 東松山 IC 付近位置関係図

の密度の変動に影響を与え、この密度の変動がさらに上流への粗密の伝播に繋がっているものと考えられる。

(2) 分合流交通量と第1走行車線の密度の関係

図-8は、分析対象日のうち代表的な3日分について、渋滞発生時間帯中の分流交通量・合流交通量と第1車線の密度の関係について見たものである。各渋滞発生日で分流交通量・合流交通量の大小は異なるが、全体的に見て、分流交通量に対して合流交通量が多い時間帯において第1車線の交通密度が高い傾向が見て取れる。

(3) その他の影響要因に関する分析

分合流交通量が第1車線の密度に影響を与えることについては、交通状況や走行環境、天候、ドライバー特性、渋滞巻き込まれ時間など、さまざまな条件によって影響度合いが異なるものと考えられる。ここでは、花園ICでの渋滞の有無や日没前後での違いについて確認することとした。

図-9、図-10は、分合流交通量差と第1車線の交通密度の関係について、それぞれ花園ICの渋滞発生日別・日没前後別に比較したものである。図-9によると、花園ICの渋滞の有無に関わらず、分合流交通量差と第1車線の密度に一定の相関がある。一方、図-10によると、日没前よりも日没後の方が分合流交通量差と第1車線密度との相関が強いことが分かる。この要因として、日没後は分合流部における車線変更や避走等の行動が消極的になり、分合流交通が、第1車線により強く影響することが考えられる。さらに図-11は代表的な2日分について、日没前後別に分合流交通量・合流交通量と第1車線密度の関係を示したものである。日没後は、いずれの渋滞日についても合流交通量と第1車線密度の関係がはっきり表れていることが確認できる。なお、全体的に日没後は分合流交通の絶対量が減少する傾向にあり、先に述べた日没による影響は交通量そのものの違いによる要因も含まれることも考えられる。また今回の分析では、天候や渋滞巻き込まれ時間など、その他考えられる影響要因については未検討である。日没前後による影響の大小については、さらにサンプル増やし、同様の条件間で比較するなど詳細な分析が必要であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、都市間高速道路のサグ渋滞におけるボトルネック上流の交通現象について把握するため、関越道上りの高坂サグを対象に、車両感知器の5分間データを用いてボトルネック上流区間の交通密度の特性について分析を行った。その結果、渋滞の上流側では交通密度の平均値は概ね一定であるものの、インター周辺や縦断・平面線形が厳しい箇所では高くなる傾向にあり、さらにボトルネックに最も近い東松山ICから密度の変動が大きくなることが明らかとなった。また、渋滞中の分合流交通量と第1車線の密度に相関が見られたことから、インターでの分合流交通が粗密の増幅のきっかけとなる可能性があることを明らかにした。さらに、日没前後など異なる状況下において、分合流交通による本線交通への影響の程度が異なるであろうことを示唆した。

一方、本研究で用いた感知器データのみでは、第1車線で発生する密度の変動が、第2・第3車線や、上流・下

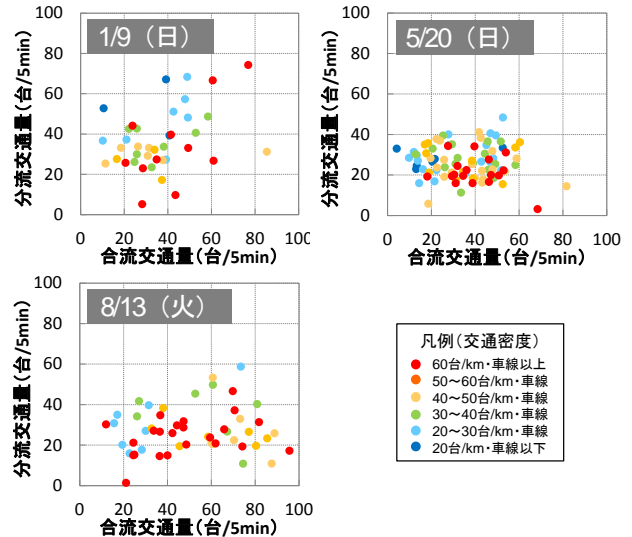


図-8 分合流交通量と第1車線密度の関係

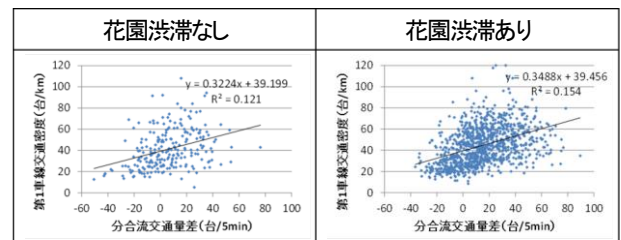


図-9 分合流交通量差と第1車線密度の関係 (花園 IC 渋滞発生有無別)

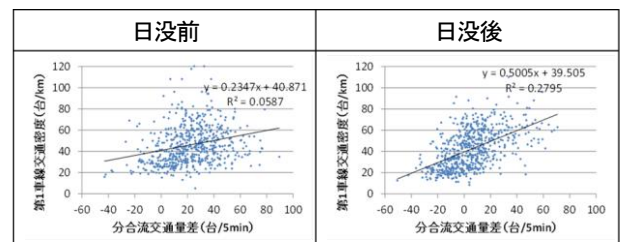


図-10 分合流交通量と第1車線密度の関係 (日没前後別)

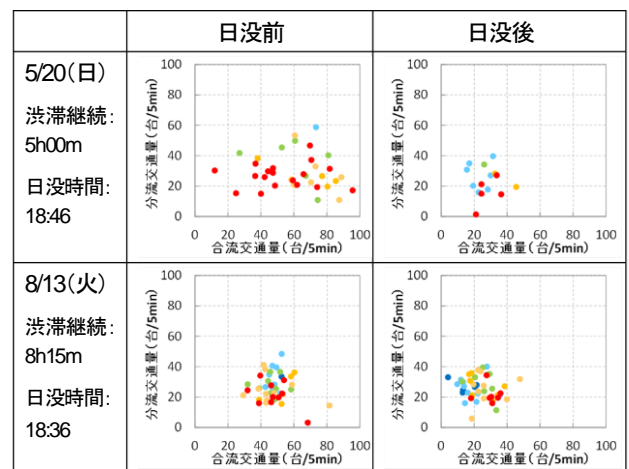


図-11 分合流交通量と第1車線密度の関係

流側の密度変動にどのように影響が波及していくか把握するには至らなかった。今後は、現地観測調査も含め、渋滞中の分合流交通量がどのようなメカニズムで本線交通流に影響し、交通密度の粗密の増幅に繋がるか明らかにする必要があると考えられる。さらにこれらの関係を定量化し、渋滞シミュレーション等への活用についても検討を行う予定である。

謝辞

本研究の実施に際して、東日本高速道路株式会社関東支社管理事業部道路管制センター交通技術課からデータ提供を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文誌，No.371，pp.1-7，1986.
- 2) 越正毅，桑原雅夫，赤羽弘和：高速道路のトンネル，サグにおける渋滞現象に関する研究，土木学会論文誌，No.458，pp.65-71，1993.
- 3) 大口敬：高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係，土木学会論文誌，No.524，pp.69-78，1995.
- 4) 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，土木学会論文誌，No.660，pp.39-51，2000.
- 5) 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，土木学会論文誌，D，Vol.63，No.1，pp.65-75，2007.
- 6) 葛西誠，野中康弘，内山久雄：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の交通流再現性の検証，土木学会論文誌，D，vol.65，No.3，pp.211-224，2009.
- 7) 岡村秀樹，渡辺修治，泉正之：高速道路単路部の交通容量に関する調査研究(下)，高速道路と自動車，Vol.44，No.3，pp.30-40，2001.
- 8) 大口敬，片倉正彦，鹿田成則：高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究，高速道路と自動車，Vol.44，No.12，pp.27-34，2001.
- 9) Xing, J., 佐藤久長，高橋秀喜，吉川良一：高速道路のボトルネック交通容量分布及び渋滞発生確率の推定，第 26 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.49-52，2006.
- 10) 稲野晃，中村英樹，内海泰輔：複数ボトルネックを含む高速道路区間における渋滞現象の確率的解析，高速道路と自動車，Vol.52，No.1，pp.19-29，2009.
- 11) Xing, J., 宇佐美純二，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・論文誌，Vol.27，No.5，pp.973-980，2010.
- 12) 小林正人，中村英樹，浅野美帆，米川英雄：都市間高速道路におけるボトルネック交通量の確率的分析，交通工学研究発表会論文誌，Vol.31，No.26，pp.133-138，2011.

(2016. 4. 22 受付)

Analysis of Traffic Characteristics of the Upstream Bottleneck of Sag Congestion

Nanami Matsuyama, Keisuke Yoshioka, Sumio Shimokawa,
Hirohisa Morita and Ryota Horiguchi