

臨界時標準交通流の考え方と交通状態推定への適用可能性

岡田 允孝¹・葛西 誠²・寺部 慎太郎³

¹非会員 株式会社総合技術コンサルタント (〒101-0048 東京都千代田区神田司町2-7)

E-mail: m-okada@sogo-eng.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail: kasai@ri-nexco.co.jp

³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

高速道路単路部の交通状態推定にはプローブや車両感知器等の観測データだけではなく交通容量を与える必要がある。しかし交通容量の性質は未だ明確ではなく、渋滞発生時交通容量は確率的に変動することが知られており扱いが難しい。本稿では、サグ等のボトルネック部の交通流現象として何が生じているのか、ドライビングシミュレータ実験データを共分散構造分析に適用することで再考する。推定結果からは、縦断線形が車頭時間に及ぼす影響が比較的長い区間に亘って相関を持つ可能性が指摘され、長い範囲の交通流を一括で説明するモデル等の必要性が示唆される。これを踏まえ、将来の交通状態推定における渋滞発生時の取扱いとして、縦断線形と渋滞発生時交通流の関係について参照可能なデータベースの整備と、それとプローブデータとの照合方法を、1案として述べる。

Key Words: traffic capacity, break-down phenomena, traffic estimation, structural equation modeling

1. はじめに

交通変分理論の¹⁾²⁾登場以来、交通流理論の再整備が急速に進みつつある³⁾。これは単路における交通状態推定の理論的基盤を与え、プローブによる交通流の時空間的な部分的観測データから交通状態推定が可能⁴⁾となるなど、実用上の応用も大いに期待される。また単路のみならずネットワークの交通状態推定に対しても理論検討が進みつつあり、環状ネットワーク時代における交通マネジメントの高度化につながる事が期待される。

一方で、重要であるが極めて難しい研究対象であり、従前の研究を大きく超えるような進展がみられないのが交通容量の性質⁵⁾についてである。単路の交通状態推定においては、観測データとしての車両感知器データ、プローブデータが時空間的に稠密であればさほど問題にならないであろうが、プローブの普及途上ではある程度の渋滞検知遅れは避けがたい。また車両感知器が疎の区間であればそもそもボトルネック位置が正確に把握できていない可能性もある。

渋滞発生時の交通容量は確率変数であるとされ⁶⁾、交

通状態推定においては取扱いが難しい。そもそも、交通容量はある程度長い観測時間における台数を集計してはじめて得られるいわばマクロ的な量であるが、自由流から渋滞流への遷移は現状ではミクロ的視点で仮説⁷⁾⁸⁾が提示されており、ここでマクロとミクロを繋ぐ何らかの仕掛けが必要である。

一般にはミクロの集積でマクロを生成するために交通流シミュレーションがその仕掛けとなる⁷⁾¹⁰⁾が、ある縦断線形が与えられたときに、そこで生じる交通流を予測し得るミクロモデルを既にわれわれが手にしているかは一考の余地がある。縦断線形の影響を考慮したミクロモデルはいくつかあるが、実際に渋滞している区間を対象に交通流再現性を検証している⁷⁾¹⁰⁾。したがって、例えば全く任意の道路線形(例えば新規供用区間)に対してボトルネックがどこに生じ、ボトルネック容量がどの程度となるのかを予測できる保証はない。すなわち、渋滞発生時の交通流現象について、その本質を未だ我々はよく知らないと考えべきである。

本稿では、ボトルネック上で渋滞発生時に何が起きているのかを実験データを基に再考してみることにする。

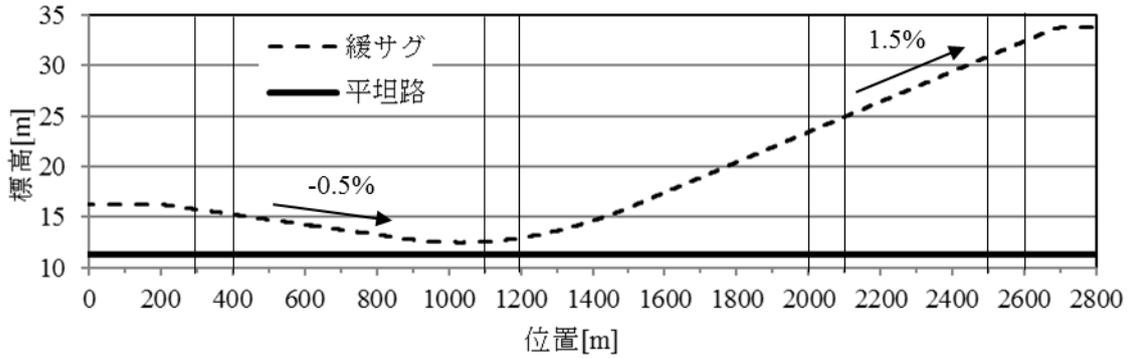


図-1 緩サグ・平坦路の縦断線形

2. 考察に用いるデータ

これまで筆者ら^{11,12)}が試行してきた単路部ボトルネックにおける交通流現象を説明しようとする取組みでは、ドライビングシミュレータによる追従積重ね試験データを使うことが多かった。この試験の特徴は、構成要素が実交通流と比較して均一な交通流が生成できると期待されることにある。例えば追従挙動モデルのようなもので交通流を表現すれば、モデルのパラメータが全てほぼ同一の車からなる交通流が生成されると解釈できる。このことは、縦断線形が異なれば、交通流がどのように異なるかの相对比较が可能となることを意味する。

実験方法の詳細については文献^{11,12)}に譲る。ここでは概略を簡単に述べる。解析に用いるデータは、図-1に示す通り2種類のコース「緩サグ」と「平坦路」で取得されたものである。1名の被験者が繰り返し自分自身の走行軌跡の後を追従する。追従の繰り返し回数は20回である。緩サグでは9名、平坦路では8名が被験者として参加している。図-2および図-3に、緩サグおよび平坦路におけるある1名の試験結果のTime-space図を例示しておく。

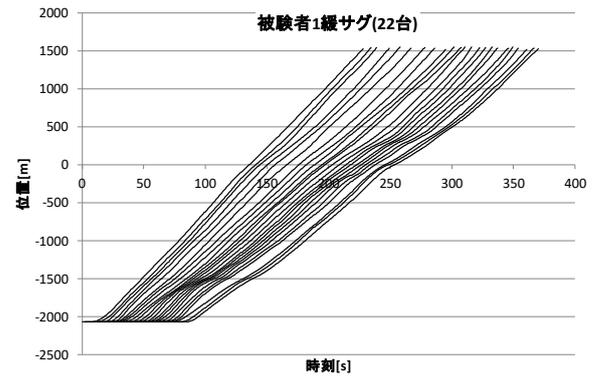


図-2 Time-space 図 (緩サグ)

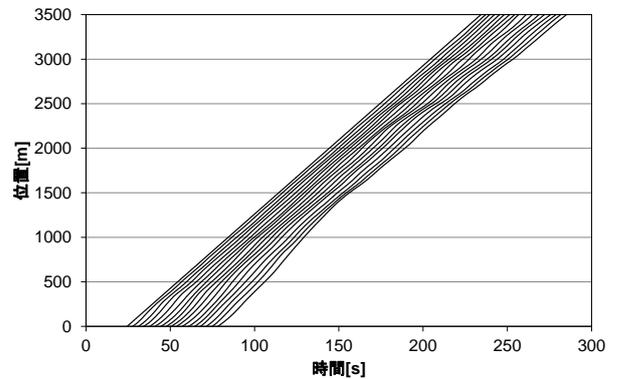


図-3 Time-space 図 (平坦路)

3. サグ内の車頭時間依存性

サグ区間で車頭時間がどのように依存関係にあるかを考察するために、追従積重ね試験データに共分散構造分析(SEM)を適用してみる。

この分析の狙いは2つある：1)緩サグと平坦路の比較、2)サグ内での車頭時間の相関関係を明らかにすること、である。上記1)を行うために、2つの異なる母集団（緩サグ、平坦路の2つ）に対して、別個に共分散構造分析モデルのパラメータ推定を行うのではなく、多母集団同時分析を適用する。ここでは、いくつかのパス係数は異なる母集団に属していても同じ値をとる、と仮定される。

この制約を「等値制約」と呼ぶ。どのパスに等値制約を設けるかは複数のパターンがあり得る。

図-4は本稿で用いる共分散構造モデルの基本形を示している。最左列は、追従積重ね試験で得られた車頭時間が代入される観測変数である。入力されるデータは、200mの観測位置を例に説明すれば、追従積重ね試験の2台目の車頭時間、3台目の車頭時間、…、20台目の車頭時間となっている。車頭時間の観測位置の取り方は図に示す通り8つとしているが、他にも多様な可能性があることに留意されたい。潜在変数はA~Dの4つである。

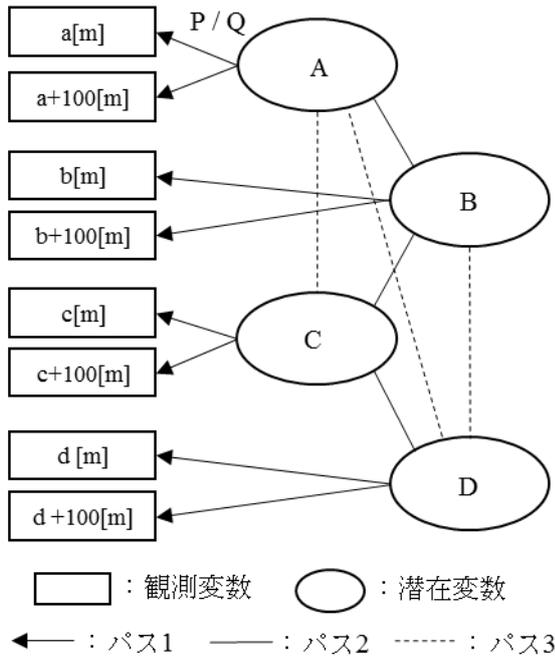


図-4 モデル構造

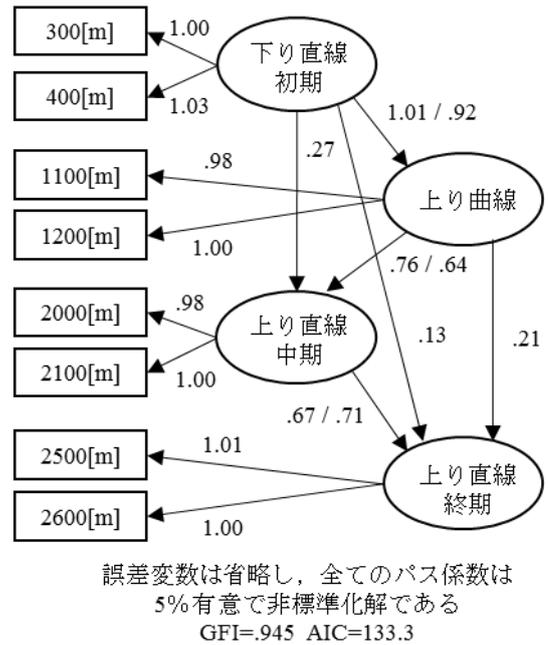


図-5 緩サグと平坦路の他母集団同時分析結果

表-1 等値制約の設定条件

モデル番号	パス係数の等値制約		
	パス1	パス2	パス3
1	無	無	無
2	有	無	無
3	無	有	無
4	無	有	有
5	有	無	有
6	有	有	有

表-2 適合度指標 (緩サグと平坦路)

モデル番号	GFI	AIC
1	0.950	141.3
2	0.950	133.4
3	0.946	141.0
4	0.942	139.5
5	0.945	133.3
6	0.941	132.4

これらは、縦断線形が車頭時間に及ぼす影響を暗示している変数とみなせる。

等値制約をどのパスに与えるかを説明するために、図-4では「パス1」「パス2」「パス3」と異なる名前を付けて区別する。表-1では6種類の異なる等値制約の置き方を示しており、順にモデル1, モデル2, ..., モデル6と名付ける。なお、等値制約を置かないパスの場合、緩サグと平坦路で異なるパス係数が推定される。図-4の「P/Q」は、Pが緩サグの係数を、Qが平坦路の係数を意味する。

表-2に各モデル推定後の適合度指標 GFI と、赤池情報

量基準 AIC を示す。AIC 最小はモデル 6, 次いで僅差でモデル 5 となっている。モデル 6 は実はすべてのパスに等値制約を設けたもの (表-1) であり、緩サグと平坦路との間で、縦断線形が車頭時間に与える影響を区別することができないモデルが最も説明力があるということになってしまう。これはドライビングシミュレータを用いることの限界かもしれないし、図-4 が真のモデルから遠い可能性もある。とはいえ、モデル 6 とモデル 5 の AIC の差は 2 に満たず、両者の推定結果は誤差の範囲ともいえる。最も楽観的に解釈すれば、緩サグと平坦路の違いは非常に繊細であることを暗示しているようにも受け取れる。

次善のモデル 5 に基づいて解釈をしてみる。図-5 に推定されたパス係数を図示する。便宜的に、図-4 で A, B, C, D と示した潜在変数に対して「下り直線初期」「上り曲線」「上り直線初期」「上り直線終期」と命名しておく。

着目すべきは、潜在変数間のパス係数が決して小さな推定値ではないことである。例えば、緩サグにおける「上り曲線」と「上り直線中期」との間のパス係数は緩サグでは 0.76 である。なお、この緩サグにおけるパス係数と平坦路のパス係数 0.64 とは 10%水準で有意傾向であることも確認されている。このことは、縦断線形が車頭時間に及ぼす影響は、地点毎に独立ではないことを意味する。今の場合では 1100m から 2100m の約 1km の範囲内で、車頭時間に与える影響は長距離にわたってゆっくり変化すると解釈できる。例えば追従モデルのよう

なある地点の「瞬間的な」入力-出力関係のみで渋滞現象を説明し得るものであるか否か再検討が必要であることを意味している。

4. おわりに

本稿は、渋滞発生時の交通流に何が生じているのかを、ドライビングシミュレータによるデータを共分散構造分析に適用し、この推定結果の助けを借りながら考察してみたものである。その結果、縦断線形が車頭時間に与える影響は、比較的長い範囲で相関があると考えられることができる。

なぜこのような推定結果となるのか、サグ内で生じている現象としてあり得る仮説を以下に提示しておく。渋滞発生時は、1)減速波の上流伝播によって下流の情報が上流に流れるのみならず、2)交通流の移流によって上流の情報が下流に流れる、これらがキャンセルされず増幅される絶妙のバランスが生じるとき、渋滞が発生するのである。この仮説をそのままモデル化することは簡単ではなく、交通状態推定における渋滞発生への扱いに工夫が必要である。

このような工夫として、プローブデータが以前よりも潤沢に入手できる時代となってきたことを前提とすれば、いくつかの方法が考えられるだろう。1つは、このようなドライビングシミュレータによって取得されたデータを元に、縦断線形と車頭時間の変動の関係についてパターンを生成して「標準的な交通流」を用意しておき、リアルタイムに取得されたプローブデータと照合して渋滞が発生しそうであるか否かを判断する方法である。いわば過去データとリアルタイムデータとの特徴量の比較であり、パターンマッチングの文脈でとらえることもできる。もちろんドライビングシミュレータと実路との対応が課題となるが、個々の車両の状態が完全に一致するような照合を目指す必要はなく何らか特徴を示す状態量（車頭時間、車頭時間の変動係数等）がある程度一致すれば十分かもしれない。

参考文献

- 1) Daganzo, C. F: A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions, *Transportation Research Part B*, Vol.39, pp.187-196, 2005.
- 2) Daganzo, C. F: A variational formulation of kinematic waves: Solution methods, *Transportation Research Part B*, Vol.39, pp.934-950, 2005.
- 3) 和田健太郎, 瀬尾亨, 中西航, 佐津川功季, 柳原正実: Kinematic Wave 理論の近年の発展に関する研究解説, Working Paper, 2017.
- 4) 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, 2013.
- 5) 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, Vol.67, No.3, pp.217-229, 2011.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Ozaki, H.: Reaction and anticipation in the car-following behavior, *Proceedings of 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 349-366, 1993.
- 9) Goñi Ros, B., Knoop, V. L., Shiomi, Y., Takahashi, T., vanArem, B. and Hoogendoorn, S. P.: Modeling traffic at sags, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol.14, pp.64-74, 2016.
- 10) 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.
- 11) 葛西誠: ドライビングシミュレータ追従積重ね試験と階層ベイズ法による縦断線形の影響の抽出, Vol.71, No.5, p.I_917-I_929, 2015.
- 12) 岡田允孝, 葛西誠, 寺部慎太郎, 康楠: 追従積重ね試験データへの共分散構造分析適用による縦断線形変化の影響抽出, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, pp.1626-1629, 2016.

(2017.4.28 受付)

A TRIAL OF TRAFFIC FLOW ESTIMATION WITH REFERENCE TO STANDARD TRAFFIC FLOW IN CRITICAL FLOW STATE

Masataka OKADA, Makoto KASAI and Shintaro TERABE