

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

越 正毅*・桑原雅夫**・赤羽弘和***

1980年代の初頭から、わが国の高速道路のいくつかのトンネルや縦断勾配の変化するサグなどが交通容量上のボトルネックになることが知られてきた。本稿は、これらの地点において観測された交通現象を報告するとともに、ボトルネックとなる理由と渋滞のメカニズムに関する仮説を述べたものである。これらの地点の容量は、渋滞が発生する前においても通常の単路容量と比べるとかなり低い。一旦渋滞が発生すると、一段と容量が低下し、渋滞長が長くなるに連れ、ますます低下してしまう。本稿では、この現象のメカニズムを追従挙動に基づいて分析し、ドライバーが渋滞列の中を走行する時間と周囲の明るさ等が追従挙動と関連していることを示唆している。

Keywords: traffic capacity, car-following behaviour, motorway, sag, tunnel

1. はじめに

1980年代の初頭以来、高速道路のトンネルやサグ（縦断勾配の凹部の底部）が交通容量上のボトルネックとなりえることが、道路工学や交通工学の技術者に認識されてきた。これらのボトルネックでは、休日に渋滞が発生することが多い。通過車両のほとんどが乗用車であるにも関わらず、そのときの交通容量は2車線合計で2200~2700[pcu/時]程度であり、これまでに信じられていた可能交通容量4000[pcu/時/2車線]を大幅に下回る。しかし、HCM(Highway Capacity Manual)をはじめ、現行のいかなる道路工学および交通工学の教科書やマニュアルも、トンネルおよびサグにおけるこのような容量低下に言及してはいない。

著者等はこれまで、このような現象について研究発表してきたが、本稿は特に、(1)渋滞発生時における渋滞頭部の車両挙動の観測結果に基づいた、渋滞発生メカニズムの仮説の検証、(2)自由流から渋滞流への遷移についての考察、(3)渋滞が安定してからでも容量が変化する現象の報告と考察、をまとめたものである。

2. トンネルおよびサグにおける交通渋滞の巨視的側面

図-1は、サグあるいはトンネルの直近上流部における、渋滞発生前後の交通量と速度の典型的な時間変動パターンを示す。速度は、交通量が増加するにつれて徐々に低下して行くが、交通量が図-1においてAで示されるような値に達すると速度も交通量も急激に低下する。これが、渋滞の発生の瞬間である。このレベルAの交通

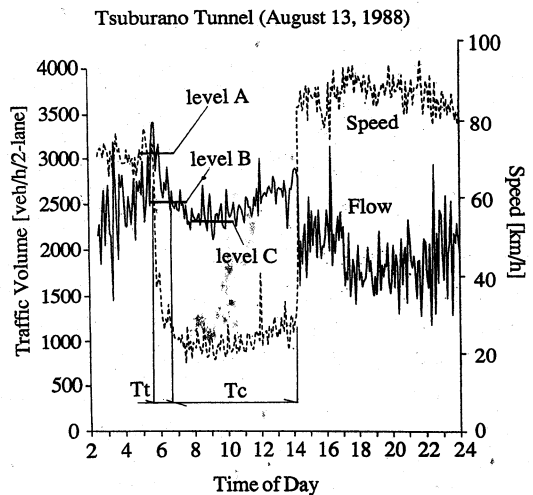


Fig.1 A Typical Example of Motorway Tunnel Congestion (5-min. Data of Detectors at 200 m Upstream of the Tunnel Entrance).

量を、「渋滞前の容量」と呼ぶことにする。この瞬間以降は、ボトルネックの上流で渋滞列が形成されるので、交通量はボトルネック容量を示していることになる。渋滞発生後には、速度はある遷移期間 T_t を経て比較的安定した渋滞速度まで安定する。これにつれて、交通量もレベルB、さらにはレベルCにまで低下する。このレベルB~Cの値を、「渋滞中の容量」と呼ぶことにする。

レベルAにおける2車線合計の5分間交通量は、約250台である。渋滞が休日に発生し、そのときの通過車両のほとんどが乗用車であることから、乗用車換算交通量もほぼ250[pcu]とみなせる。これは交通流率で3000[pcu/時/2車線]に相当するが、単路部における4000[pcu/時/2車線]と比較して著しく低いことは明かである。容量がレベルAからレベルBに低下するまでにはいくらかの遷移時間 T_t を要するが、この遷移

* 正会員 工博 東京大学工学部 教授
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 Ph. D 東京大学生産技術研究所助教授

*** 正会員 工修 工博 千葉工業大学工学部 助教授

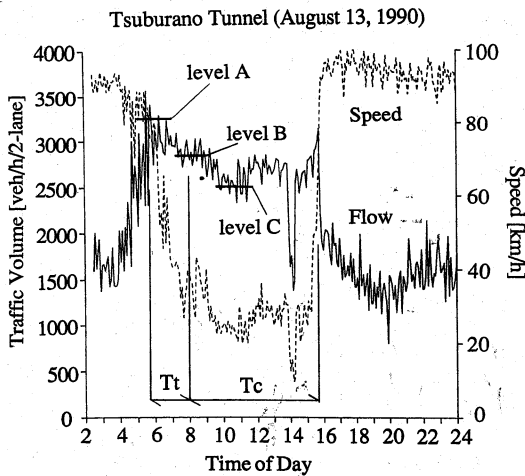


Fig.2 Another Example of Congestion at the Same Site as in Fig.1.

時間は同一のボトルネックにおいてさえ状況に応じて大きく変動する。図一に示す例においては、この遷移時間は5:30から6:30までの約1時間であった。しかし、図二に示す同じボトルネックにおける他の日の例においては、遷移におよそ2時間を要している。渋滞後の容量はその後レベルCまで徐々に低下し続け、次いで再びレベルBまで増加し、渋滞は解消する。

表一および表二に示すように、東名高速道路や中央高速道路の主要なボトルネックにおいても、同様な観測結果が多数得られている。「渋滞中の容量」は2200~2700[pcu/時/2車線]であり、単路部の容量よりかなり低い。

3. トンネルおよびサグにおける交通渋滞の微視的側面

交通量が増加するにつれて、内側車線(追越車線)を走行する車両の割合が高くなる。これは、トンネル入口部やサグに限らず、おそらくわが国の高速道路の一般現象であろう。2車線区間の渋滞前の容量値は交通流率で約3000[pcu/時/2車線]であり、そのときの追越車線利用率は60%程度である。このことは、追越車線のみに着目すれば、交通流率は概ね2000[pcu/時/車線]に達しており、単路部と同等の容量を有していることを示している。このように車線利用率に偏りが生ずるのは、追越しを終えた車が走行車線に戻らず、引続き追い越し車線を走行する傾向があるためである。このような追越し車線を漫然とあるいは意図的に比較的低速で走行する車両のために、より高速の車が追い越しをするのを妨げられて大きな車群が形成されてしまう。

追越車線を走行する車群がサグにさしかかると、勾配が増加するのにそれを補うためのアクセル操作が十分に

Table 1 Major Bottleneck Sags.

Motorway	Location (Kilopost)	Gradient (%)	Capacity during Congestion (veh/h/2-lane)
Chuo EB	Sagamiko (43)	-3.5~+4.5	2600~2800
Chuo EB	Sarunashi (65)	-1.3~+2.5	—
Chuo WB	Motohachioji (32)	+1.0~+2.7	2500~2700
Chuo WB	Tsurukawa (52)	-0.3~+5.0	2500~2700
Tomei EB	Nakai (53)	-3.4~+4.8	2500~2700
Tomei EB	Matsuda (57)	+1.7~+4.8	2500~2800
Tomei EB	Isehara (44)	-0.3~+1.4	2500~2700
Tomei EB	Hadano (47)	-2.6~-0.3	2500~2800
Tomei WB	Atsugi (40)	-0.6~+2.0	about 3000
Tomei WB	Hadano (47)	+0.3~+2.6	2500~2700

Table 2 Major Bottleneck Tunnels.

Motorway (Tunnel)	Length (km)	Gradient (%)	Horizontal Curve Radius(m)	Capacity during Congestion (veh/h/2-lane)
Chuo EB (Kobotoke)	2.0	+3.2~+4.0	+5000	2600~2700
Chuo EB (Otsuki)	0.5	-0.6	+2500	2200~2400
Chuo WB (Otsuki)	0.47	+0.6	-2500	—
Tomei EB (Nihonzaka)	2.0	+2.5~+1.8	∞	about 2700
Tomei EB (Tsuburano)	1.66	+0.5~+1.7	∞	2800~3000
Tomei WB (Nihonzaka)	2.0	+1.8~+2.5	∞	2600~2700
Tomei WB (Tsuburano)	1.66	+1.7~+0.5	∞	2500~2600

ないために、先行車の速度は僅かに低下する。この車群の先頭に発生した僅かな速度低下はショックウェーブとなり、車群後方に向けて増幅・伝播され、やがて車群後方の車が完全停止を強いられるまでになる。

交通流率が3000[pcu/時/2車線]程度になると、このようにして停止に到った先行の車群の末尾が動き出す前に後続の車群が到着してしまい、追越車線上の全車が一旦停止ないしは徐行を強いられるという状態に陥る。この状態になると、追越車線を走行してくる車両の多くは、停止するのを避けようとして、走行車線に車線変更する。この車線変更により走行車線における交通量は急激に増大し、大きく流れが乱されるため、走行車線もほとんど同時に停止ないし徐行状態に陥る。これが渋滞の始まりである。車群先頭車のわずかな減速が後方に増幅されながら伝播するために、車群の後尾の車は停止に至ってしまう。渋滞の始まりにおける現象はおそらく、個々のドライバーが自分の車がショックウェーブの伝播によって速度が低下したにも関わらず、前方車との車間距離を減速前と同じように保ちながら走行しようとすることに起因しているものと思われる。

渋滞を引き起こす最初のショックウェーブはサグより

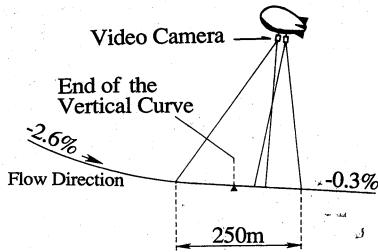


Fig.3 Traffic Observation using Video Cameras mounted on the Balloon at Hadano Sag.

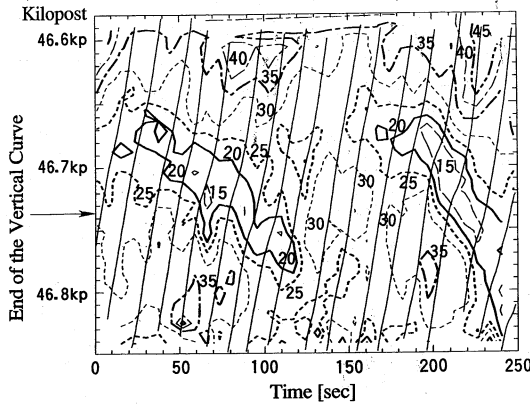


Fig.4 Speed Contour Lines and Vehicle Trajectories in Congested Flow at Hadano Sag.

下流で発生し、遷移期間後には渋滞の先頭はサグ近傍に停留する。しかし、遷移期間には先頭位置は常に同じ地点に位置しているのではなく、ボトルネック付近に現れては上流に後退し消滅するという現象を繰り返しているものと思われる。観測データは限られているものの、渋滞中であっても小さな減速波がサグを通り越した区間でいくつも発生していることがわかっている。一例として、東名高速道路上り 47 Kp の秦野サグにおいて、渋滞列の先頭付近約 250 m 区間の車両挙動を図-3 に示すような気球に積載したビデオカメラで撮影を行った結果を示す¹⁾。図-4 は、撮影画面から渋滞中 250 秒間の個々の車両の走行軌跡を読みとった結果である。図中の細い実線は、5 台おきの車両の走行軌跡を表しており、他の曲線群は走行速度のコンターラインである。時間の始点から 20~25 [km/h] の低速度域が、縦断曲線終端部の下流で発生し、約 120 秒間にわたって上流に伝搬していく様子がわかる。その後、一旦この付近の速度は若干回復するが、再び時間 150 秒くらいから低速度域が、ほとんど同じ地点から始まり、上流に伝搬している。

一旦渋滞列が形成されると、その渋滞列の先頭からの発進流率が容量を定めてしまう。この発進流率は、渋滞発生時からいくらかの時間内に低下を続け、レベル B に到る。その後も発進流率は低下傾向を維持し、やがて

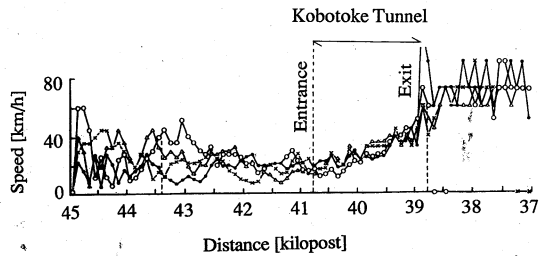


Fig.5 Speed Profiles of Floating Runs in Tunnel Entrance Congestion.

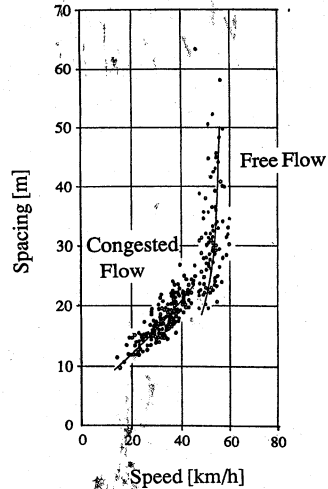


Fig.6 Speed-Spacing in Real Flow. (1-min. average speed and spacing on Tokyo Metropolitan Expressway).

レベル C にまで落ち込む。

トンネル入口の直近下流においても、明かり部から暗く閉塞的な空間に突入することによる心理的な圧迫感のために、車群先頭部の車両が速度を低下させてしまう。それから渋滞発生にいたるまでの過程は、サグにおける現象と同様である。そして、渋滞列の先頭は、トンネル入口からすぐ下流に停留する。

渋滞列先頭から発進する車両の加速は、きわめて緩慢であるという特徴を持っている。図-5 に例示するように、時速 20 km から 60 km に加速するまでに 2 km を要している。発進流中を走行する運転者は、渋滞列を抜け切ったことをすぐには認識せず、渋滞列中と同様に単純に先行車に追従しているものと思われる。そして、やがて速度が時速 70 km から 80 km 程度に回復するに到ってはじめて、すでに渋滞を抜けたことに気づくのである。

4. 追従モデル

図-6 に示すように、現実の交通流における速度-車頭間隔の関係には 2 つの領域、すなわち自由流領域と渋

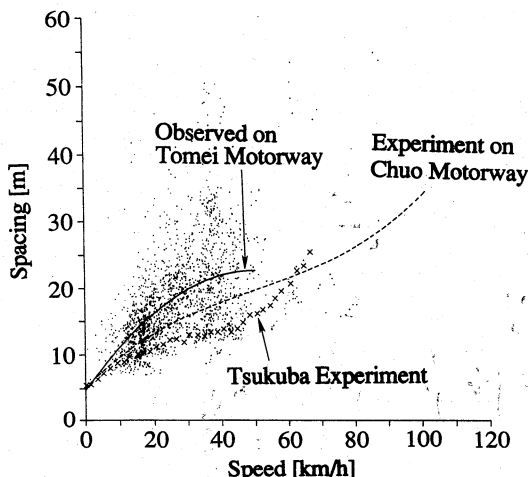


Fig.7 Speed-Spacing in Real Flow and Car-Following Experiments.

滞流領域とが存在することは、すでに著者等が指摘しているところである²⁾。一方、図-7には、図-3に示した東名高速道路の秦野サグにおける渋滞流の観測結果と、追従実験から得られた関係を合わせて示す。図中の細かなドットは、ビデオ画面上の各車両の速度と車間距離を1秒間隔で読みとった点であり、実線はこれらを2次曲線で回帰したものである。また、図中における筑波追従実験³⁾で得られた速度と車間距離の関係は、建設省土木研究所のテストコースにおいて、29台の車両を追従走行させて観測したものである。同じく図中の中央高速道路の追従実験⁴⁾とは、当研究室の実験車両を中央高速道路で実走行させて、実験車両の速度と前車との車間距離を計測したものである。2種類の追従実験の結果からは、図-6のような明確な2つの領域は判別できない。さらに、全ドライバーが被験者で構成される筑波追従実験や中央高速道路の追従実験から得られた車間距離は、同じ走行速度に対しても実交通流で得られた車間距離に比べて短いことがわかる。

このような現象に対する著者等の仮説は以下のようである。すなわち、渋滞流中の運転者は、先行車を追い越して希望する速度を回復できる見込みがないため、自由流中と比較して弛緩した状態で運転している。つまり前車が進行して車間距離が開くので、それにつられて遅れて前進する。これに対して追従実験における被験者は、先行車に追従するように指示されたため、渋滞流中においても自由流中においても同等な緊張感をもって運転しており、自由流と渋滞流とが連続した形になったものと考えられよう。

実際の自由流中では、自らの希望速度により低速で前車に追従を強いられる車両は、苛立って前車との間隔を詰めて走行するという挙動があるとする仮説を越は立て

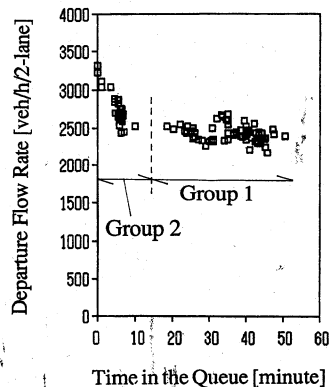


Fig.8 Departure Flow Rate vs. Time in the Queue for the Congestion Case Shown in Fig.1 (15 min. Moving Average at 5 min. Intervals).

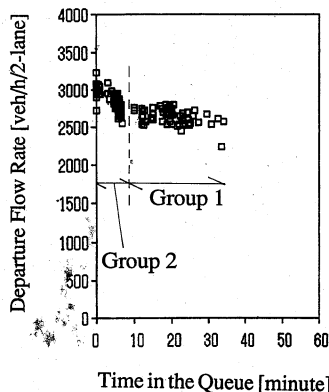


Fig.9 Departure Flow Rate vs. Time in the Queue for the Congestion Case Shown in Fig.2. (15 min. Moving Average at 5 min. Intervals).

ている^{5),6)}。この挙動が、自由流と渋滞流との間にギャップを生ずる原因の一つと考えるわけである。このような意味で、渋滞流は前車に引かれて走るいわば負圧の流れであり、自由流は前車に抑えられて走る正圧の流れであると捉えることができる。

5. 自由流から渋滞流への遷移

図-1に示されているように、交通量がレベルAからBに減少する時間間隔 Tt が自由流から渋滞流への遷移時間と考えられる。

ドライバーはこの遷移時間 Tt の間に、自由流における追従挙動から渋滞流における追従挙動に運転挙動を変化させていると思われる。この遷移時間 Tt は、図-1, 2にあるように渋滞ケースごとにかなりバラついている。

一方図-8, 9は、それぞれ図-1, 2のケースにおける渋滞の頭からの発進流率と、ドライバーが渋滞流の中を通過してきた時間、すなわち“渋滞巻き込まれ時間”と

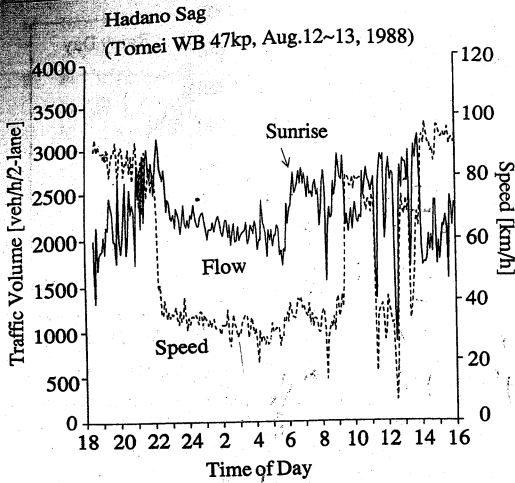


Fig.10 Increase of Departure Flow Rate at Sunrise (1).

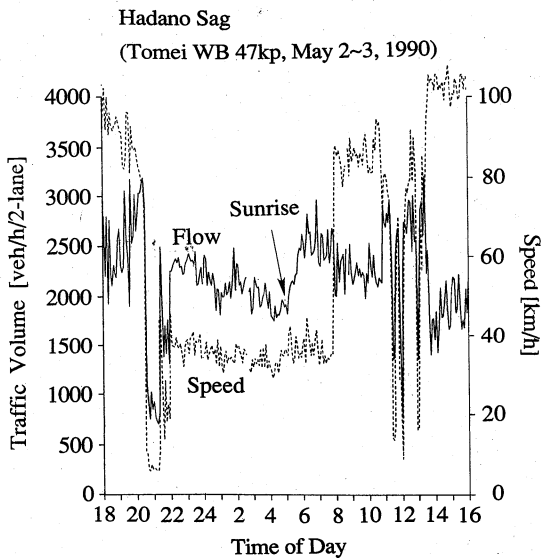


Fig.11 Increase of Departure Flow Rate at Sunrise (2).

の関連を示したものである。これらの図のプロットは、図に示すように2つのグループに分けることができる。グループ1は、渋滞巻き込まれ時間が約10分以上ある渋滞の安定した領域 T_c に属するプロットである。一方、渋滞巻き込まれ時間の短いグループ2は、渋滞の開始直後と終了直前の時間帯のプロットであるが、その多くは渋滞発生直後の遷移時間 T_t におけるプロットである。これによると、1時間から2時間と大きくバラついていた実際の遷移時間の長さ T_t に関わらず、自由流から渋滞流への追従挙動の遷移は、渋滞巻き込まれ時間が10分にわずかに至らない時点で終了することがわかる。同じ様な現象は、サグとトンネルにおける全ての渋滞地点で観測されている。

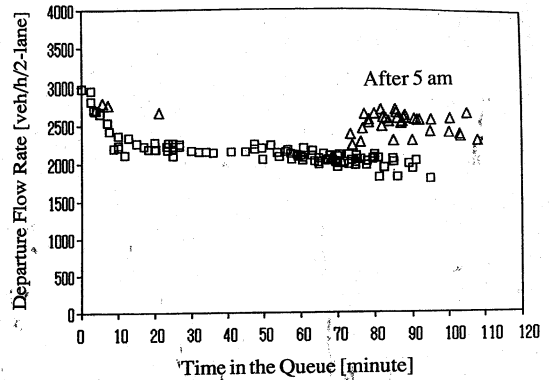


Fig.12 Departure Flow Rate vs. Time in the Queue at Sunrise for the Congestion Case Shown in Fig.10. (15 min. Moving Average at 5 min. Intervals).

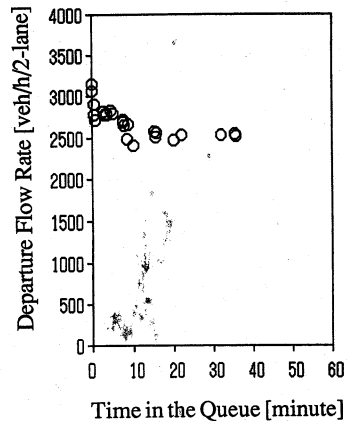


Fig.13 Departure Flow Rate vs. Time in the Queue during Daytime (At the Same Sites as in Fig.10). (15 min. Moving Average at 5 min. Intervals).

図-8, 9は安定渋滞中においても、渋滞の頭からの発進率は“渋滞巻き込まれ時間”が大きくなるに連れて減少することを示している。つまり、ドライバーは渋滞に長い時間巻き込まれるにしたがって、前車に真剣に追従しようとする意欲を失い、車間距離を大きく開けて走行するようになるために発進率が低下するものと考えられる。

6. 明るさの影響

図-10, 11は、東名高速道路の秦野サグにおける渋滞の様子であるが、いずれの場合も観測当時8月の夜明けにあたる朝5時30分頃から発進率が急激に増加する状況が観察される。図-12は、図-10に示されている渋滞現象の渋滞巻き込まれ時間との関係を表した図であるが、図中の三角印のプロットがこの夜明け付近の急増する発進率に対応している。図-13は、同じ地点における日中の渋滞の際の発進率と渋滞巻き込まれ時間

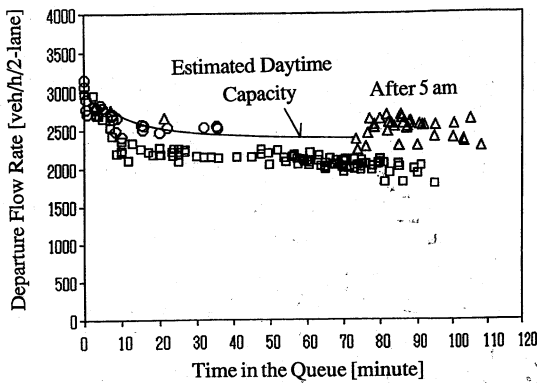


Fig.14 Comparison of Capacity at Sunrise with the Daytime Capacity (At the Same Sites as in Fig.10). (15 min. Moving Average at 5 min. Intervals).

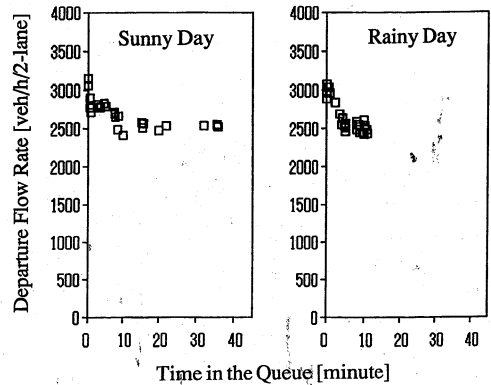


Fig.15 Effect of Weather on Capacity of a Sag (At the Same Sites as in Fig.10). (15 min. Moving Average at 5 min. Intervals).

との関係を表しており、図-14は図-12に図-13を重ね併せた図である。図-14の丸印が日中の発進流率であるが、夜間(四角印)と比べると、同じ渋滞巻き込まれ時間に対して日中の発進流率が大きいことがわかる。さらに、暗い状態から明るくなった夜明けの発進流率は初めから明るかった日中よりも一層大きいらしいことが図から推測される。

このような明るさによって交通容量が変化するという現象は、そのほかの渋滞でも観測されている。中央高速道路の小仏トンネルにおける発進流率は、トンネル内の照度が外に比べて高くなる日没時に増加することがわかっている。また、小仏トンネルではトンネル内路面の照度が79~90[lux]から150~200[lux]に改善されたこととともなって、発進流率が2600[pcu/時/2車線]から2700[pcu/時/2車線]に増加した。

以上の観測から、明るさの発進流率への影響としては、おそらく明るさの絶対レベルと明るさの変化という2種類の影響があるものと思われる。おそらく、明るさの絶対値が高ければ、車間距離や相対速度が認識しやすくなるであろうし、さらに明るさの変化による心理的影響も運転挙動に反映しているのであろう。

7. 天候の影響

図-15は、同一の渋滞地点における晴れの日と雨の日の交通容量を比較した図である。雨天時の観測データが限られているので、現段階では確定的な結論は出せないが、渋滞前の交通容量も渋滞中の交通容量も、天候による違いは顕著ではない。

8. 結論

- 1) トンネル入り口や縦断勾配の変化するサグにおける渋滞が観測されており、渋滞前の交通容量は一般単路部での容量に比べてかなり小さい。

- 2) トンネルやサグでの交通容量は、渋滞列が生成されると更に低下する。
- 3) 渋滞列が伸びるにしたがって、交通容量は一層低下する。
- 4) 自由流から渋滞流への追従挙動の遷移は、ドライバーが渋滞に巻き込まれた時間が10分未満程度で終了するものと思われる。
- 5) 渋滞の先頭からの発進流率は、照度が高い環境の方が大きく、さらに照度が暗い状態から明るい状態へ変化する環境では一層大きくなる。

9. おわりに

本研究の結果から思い起こすことのできる研究として、EdieとFooteが行ったアメリカ合衆国のリンカーントンネル入口でのメータリングに関する研究⁷⁾があげられる。トンネル内での渋滞現象はおそらくはトンネル内部のサグから発生したものであろう。メータリングによって交通容量が増加したという結果は、図-1に示されているレベルBの容量がレベルAに回復したことを表しているものと思われる。それはもし渋滞(メータリング等によって)回避することができれば、レベルAの交通容量が維持できると考えられるからである。

参考文献

- 1) Xing Jian・大口敬・越正毅：高速道路単路部の交通流の動的特性，土木計画学研究講演集，第14巻，pp.621~628，1991.11.
- 2) Koshi, M. et. al. : Some Findings and an Overview on Virtual Flow Characteristics, in proceedings of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.403~426, University of Toronto Press, 1983.
- 3) 越正毅・岩崎征人・大蔵泉・西宮良一：渋滞時の交通流現象に関する研究，土木学会論文報告集，第306号，pp.59~70，1981年2月.

-
- 4) Jian XING : A Study on Car-Following Behavior, 東京大学修士論文, 1989年9月.
- 5) 越 正毅 : 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, 第371号/IV-5, pp. 1~7, 1986年7月.
- 6) 越 正毅 : 高速道路トンネルの交通現象, 国際交通安全学会誌, Vol. 10, No. 1, pp. 32~38, 1984年3月.
- 7) Edie, L.C. and Foote, R.S. : Experiments on Single-Lane Flow in Tunnels, Theory of Traffic Flow, Elsevier, Amsterdam, Netherlands pp. 175~192, 1961. (1991. 12. 5 受付)
-

A STUDY ON CONGESTION PHENOMENA AT TUNNELS AND SAGS ON MOTORWAYS

Masaki KOSHI, Masao KUWAHARA and Hirokazu AKAHANE

It has been recognized since early 1980's that some of tunnels as well as vertical alignment sags in Japanese motorways tend to be capacity bottlenecks. This paper reports several facts observed at these bottlenecks and presents our hypothesis on the reason and the mechanism of the low capacities. Capacity values which are considerably lower than the usual capacity values of normal sections at the start of congestion, become even lower once the queue forms and further lower as the queue grows longer. This paper suggests that the driver's car following behavior which determines the capacity seems to relate to the time duration that the drivers have spent in the queue as well as to the light conditions.
