

高速道路トンネルの交通現象

越 正毅*

近年の交通需要増加に伴い、予期しなかった渋滞がトンネルで発生している。本稿ではまず、トンネルの交通容量が単純区間の容量に比べて極めて低いことを述べ、この容量は、同じトンネルであっても状況によって異なることを示す。次にトンネルで観測されている興味深い現象を解説し、この現象と容量、さらには線形や照明との関係について述べる。

Traffic Phenomena in Expressway Tunnels

Masaki KOSHI*

With the increase of traffic demand in recent years, unexpected congestions have been observed in tunnels. This paper first states that the traffic capacity of the tunnel is quite small compared with that of an open section, and it indicates that the capacity, for a specific tunnel, differs according to the conditions. Next it analyses particular between these phenomena and the capacity, alignment and illumination.

1. はじめに

都市間高速道路において最近、「トンネルがボトルネックになる」ということがわかってきた。ボトルネックとは、隣接する区間に比べて交通容量の低い地点または区間であって、その容量を上回る交通需要がある場合にはボトルネックを頭に渋滞車列が形成される。Table 1 は都市間高速道路でボトルネックとなっている主なトンネルと、そこで1年間に発生した渋滞件数と渋滞継続の総時間である。

渋滞1件当たりの継続時間や渋滞長は千差万別であるが、激しい渋滞になると最大渋滞長30km、継続時間は13時間を超える（1981年8月15日に中央道小仏トンネルを頭にした渋滞）ものや、他のボトルネックを原因とした渋滞と一体となり、さらに激しい渋滞を形成する（1983年8月13日に東名高速道路都府良野トンネル下り線を頭にした渋滞、最大渋滞長69km、継続時間11時間以上）こともある。

東名・中央のトンネルで渋滞の発生しやすい日を調べるといずれも行楽シーズンの日曜日、正月、盆、ゴールデンウィーク等の休日である。一方、名神の梶原、天王山の両トンネルでは平日にも渋滞し、特に8月に多い。いずれの場合も需要が増し、これがトンネルの容量を上回るために渋滞に至るという現象である。しかし、すべてのトンネルがボトルネッ

クであるわけではなく、トンネルによって交通容量は異なるようである。渋滞を惹き起こしているトンネルの容量は、低い場合（中央道小仏トンネル）には単純区間の半分近くにも落ちることが知られている。

つい数年前までトンネルが交通容量上の隘路になることは知られていなかった。道路工学上も交通工学上も、上述のようなトンネル渋滞は予期しなかった現象である。これらは在来の交通流現象論や交通流理論では説明できないし、これから建設しようとするトンネルがボトルネックになるかどうか、どの程度の交通容量を持つか予測することもできない。この問題に関する実用上の要請は、

(1)今後建設するトンネルがボトルネックにならないようにするためには、どのようなトンネルにすべきかを知ることと、

(2)すでに出来上ってしまったボトルネックトンネルの交通容量を増す方法は何かを探ることである。

本稿では、トンネルでの渋滞に限って述べることになるが、実は同様のボトルネック現象がトンネル以外の、例えば、縦断勾配の底部（サグと呼ばれている）にも発生している。これらはいずれも、運転者たちの自然な挙動から交通流の内部で生成される現象であり、その意味で、元にかかのばれば共通の根を持っている。従って、このような現象を再現できるような交通流モデル、運転者挙動モデルを定量的に確立することが、結局は求められるわけであり、交通工学にとっては大きな挑戦といえる。

* 東京大学教授（本学会員）
Professor, University of Tokyo
原稿受理 昭和59年2月3日

Table 1 渋滞のあらまし
Outline of tunnel related traffic congestions

トンネル名	年	件数	総時間
中央・小仏上り (2001m)	56	30	164
東名・都夫良野上り (1655m)	55	57	166
東名・都夫良野下り (1688m)	55	58	111
東名・日本坂上り (2005m)	55	57	78
東名・日本坂下り (2045m)	55	53	48
名神・梶原第1上り (739m)	57	123	369
名神・天王山上り (1453m)	57	32	43
名神・天王山下り (1389m)	57	111	392

2. 交通容量

トンネルが単純区間と大きく異なる点として、昼間では暗く、従って視距が短いこと、および昼夜ともに側方余裕が狭いことなどが挙げられる。運転者にとっては、暗くて見わたせる距離が短く、左右の自由度が小さいということによって、より慎重な運転を要求されるであろう。トンネルが運転者に与える影響についてはいくつかの研究があり、例えば、走行している車から前方の景色をフィルムに納め、そのフィルムを見せて景色の不快感をたずねるものや、実際にトンネルを走行させて脈拍の変化を調べたものがある。いずれの研究もトンネルは運転者に心理的圧迫を加えるという趣旨の結論を出している。このようにトンネルが、単純区間に比べて心理的に走りにくいとしても、それが実際の車両の挙動にどのように現われ、さらに交通流にどのような影響を与えているか、そして、交通容量とどう関係しているかということは解明されていない。

交通容量という用語がしばしば現われるが、定義によれば、道路の交通容量とは単位時間内（通常は1時間）にその道路の断面を通過することのできる車両の最大台数である。道路を設計する場合には、容量が他の区間に比べて著しく低い部分がないように配慮しなければならない。もし、そのような地点があれば、その地点での容量がその道路全体の容量になってしまうからである。

旧道路構造令およびその基礎となっているアメリカの H. C. M. (Highway Capacity Manual) では、基本となる容量を設定し、この値に幅員や側方余裕、勾配等の大きさによる補正係数を乗じて、実際の道路に即した容量を算定している。高規格に設計されている都市間高速道路の大部分のトンネルでは、これらの係数の大きさは単純区間の係数と差異がない。

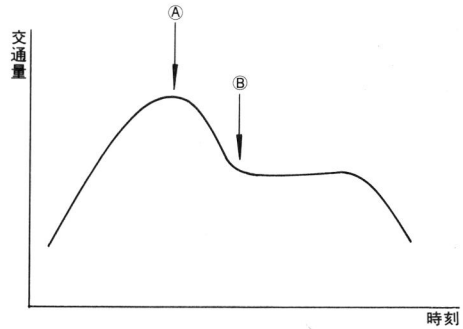


Fig. 1 小仏トンネル交通量変動模式図
Pattern of volume change in Kobotoke Tunnel

言い換えると、トンネル部では容量が低いという扱いはされておらず、単純区間と同じ容量を持つものとして設計されている。

明るさや視距と容量の関係は解明されていない。トンネル内の照明は、路面上に障害物を発見した運転者が、その障害物に衝突せずに停止できる距離(安全視距)が得られるような明るさで設計される。一般に、視距が短いと交通容量が低下するかどうかについては現在のところ確証はない。夜間の交通容量が昼間に比べて特に低くないことを考えれば、一般には、視距と交通容量の関係は強くはないものと考えてよいだろう。また、トンネル照明の照度を増せば交通容量が増すであろうことは、後述のよういくつかの調査結果からおおよそ推定できる。

3. トンネルの交通容量

次に、実測されたトンネルの交通容量値を見てみよう。Fig. 1は小仏トンネルを通過する交通量の模式図である。交通需要が増加し、Aのレベルに達するとここで渋滞が発生し、通過交通量がBのレベルまで減少していく。その後、交通量は安定し、需要が減って渋滞車列がなくなる(渋滞解消)までこの状態が続く。小仏トンネルが通し得る最大交通量はAの値であるが、しかし、いったん渋滞してしまうと渋滞車列がトンネル上流に発生して、需要は充分あるにもかかわらず、Aよりは低いBという値になってしまう。従って、容量が地点に固有の唯一の値ではなく、状況に応じて異なった値をとるものとしてとらえなければならない。これから先、Aを渋滞発生前の容量、Bを渋滞中の容量と呼んで区別することにする。

Fig. 1に示したように、渋滞発生時の交通量変動

Table 2 小仏トンネル内最大交通量
(5分間集計1時間換算値)

Maximum flow rate in Kobotoke Tunnel

日 付	台/時・2車線
56. 11. 1	3108
8	3204
15	3156
29	3000
9. 13	3168
15	3192
23	3108
10. 4	3120
11	3336
18	3324
25	3264
11. 3	3180
22	3084
23	3012

Table 3 主なトンネルの渋滞中の交通容量
Capacity when congestion in major tunnels

小仏 上り	2200~2300台/時・2車線
都夫良野 上り	2500~2700
都夫良野 下り	2200~2400
梶原 上り	2800~3000

は上に凸の形をしており、㊤の値が持続していない。従って、一般に容量の単位とされている1時間交通量の実現値を取ると、㊤のレベルよりはかなり低くなってしまいます。そこでここでは、5分間交通量値を12倍して1時間値に換算して示すことにする。

Table 2は小仏トンネルで観測された交通量の最大値である。これらの値は5分間値の12倍であるから、実際の㊤のレベルよりはかなり高めにしていることに注意しなければならない。このように最大値を見ても必ずしも常に同じではなく、容量値がどれほどかは判然としない。これは、ひとつには交通流の中に疎の部分と密の部分とがあって一様ではなく、5分間の区切り方によって、同じ交通状態でも値が異なってくることにもよる。さらに、渋滞の発生は確率的であって、全く同じ状態で交通流がトンネルに到着しても、運転者が異なれば違う行動をとることも考えられる。また、最大の5分間だけでなく、その前後の交通量も考えることが必要となろう。

このように、渋滞発生時の容量は正確に求めるものではないが、5分間率でおよそ3,000~3,200台/時・2車線程度である。1時間率ではおそらく3,000

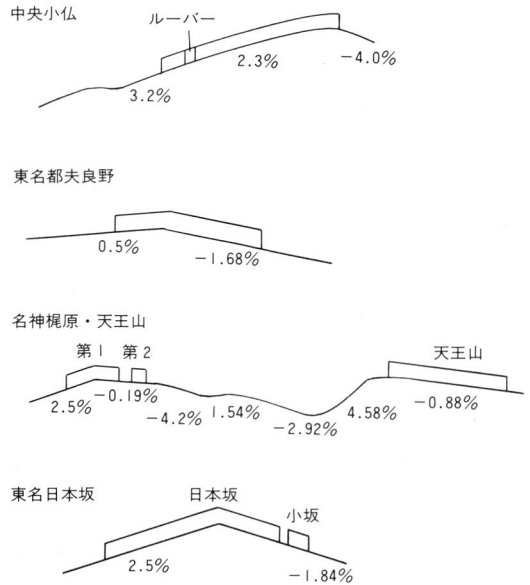


Fig. 2 主なトンネルの縦断勾配
(いずれも右向きが上り線)
Vertical alignment of major tunnels

台/時・2車線よりもやや低い程度であろう。他のトンネルでは、都夫良野、梶原でもほぼ同様の値をとる。このような値は、単純区間の交通容量とされている4,000~4,500台/時・2車線と比べると、極めて低いとすることができる。

小仏トンネルでは、Fig. 1で述べたように、いったん渋滞してしまうと容量がさらに低下する。他のトンネルでもやはり同様の傾向が見られている。Table 3は、主なトンネルにおける渋滞中の交通容量である。渋滞発生前の交通容量が各トンネルともほぼ同じであるのに対して、渋滞中の交通容量はトンネルによって大きな差がある。この差は交通の差によるというよりも、大部分はトンネルの差によるものであろうと考えている。Fig. 2は各トンネルの勾配を示している。勾配が渋滞中の容量に影響しているのはかなり確かであり、これについては後述する。

Fig. 3は、上り線都夫良野トンネルの入口直前で観測された交通量と速度の時間変動図であるが、同じ渋滞中であっても日没直後ごろから交通量・速度とも上昇している。同様な観測例がいくつかあるが、日没した後も交通量・速度とも増加しない例もある。小仏トンネルにおいても同様に、日没直後に渋滞中の交通容量が増加する例が観測されている。

このトンネル内外の明るさと交通容量との関係に

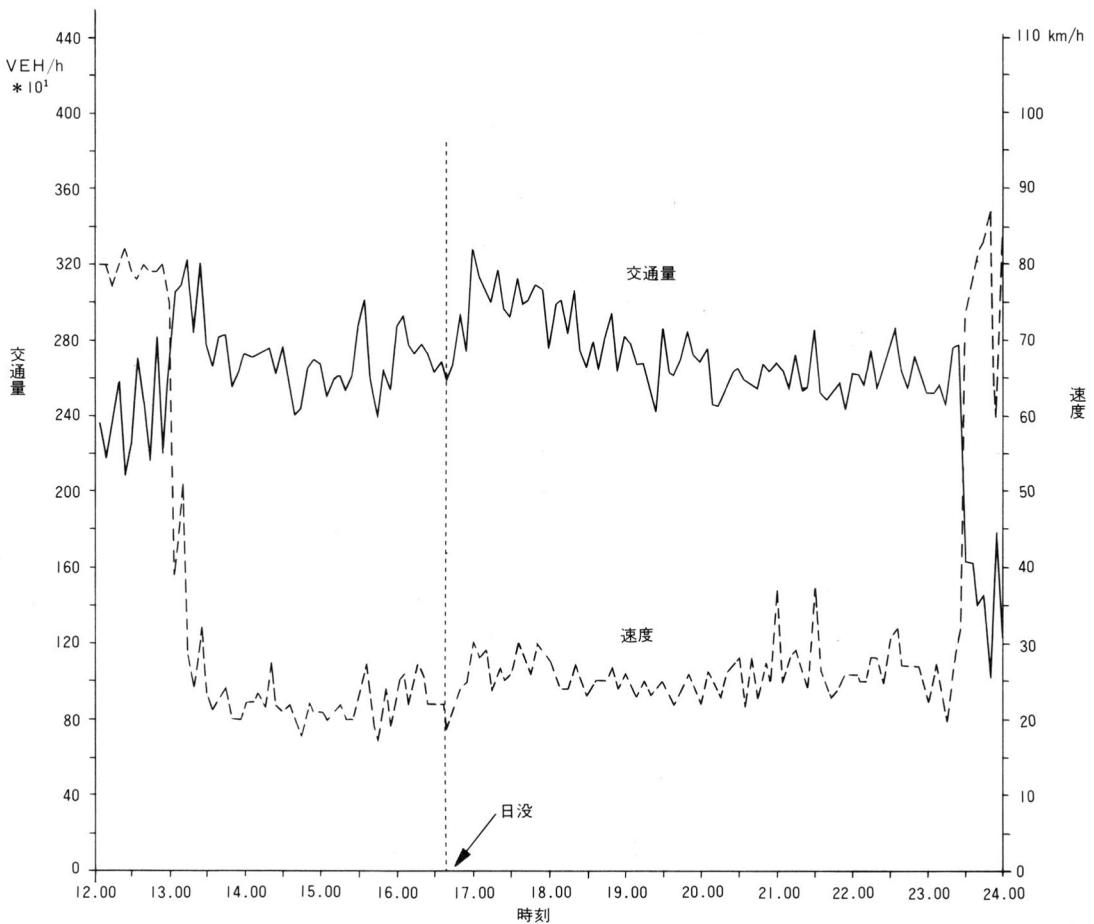


Fig.3 都夫良野トンネル上り線入口 (交通量・速度の時間変動)
Change in traffic volume and speed with time at
entrance of Thuburano Tunnel

ついても後述する。

4. 非渋滞時の車両挙動

トンネルの渋滞発生前の交通容量が何故に単純区間より低いのか、その容量値はどのようにして定まるのか、を解明するためには非渋滞時の車両挙動を調べ、渋滞のきっかけがどのようにして生成されるかを調べなければならない。

Fig. 4 は、小仏トンネル内外の車両感知器から得られたデータをもとに、車頭距離—速度の関係を示したものである。トンネル内では同じ速度に対する車頭距離が長いのがわかる。Fig. 5 は、交通の流れに乗って走るフローティング走行調査から得られた走行速度プロフィールで、非渋滞時には曲線①②のようにトンネル入口で速度が低下している。一方、

交通需要が増加してくると、各車両は独立して走行しにくくなり、相対的に速度の低い車を先頭として車群が形成される。車群内では密度が高く、追従状態で走行する。

これらのことから、次のようなモデルを頭に描くことができる。この車群がトンネルに到着すると、各車は前車の影響を受けながら車間距離—速度の関係の調節を行う。もし仮に、車群先頭車が単純区間と同じ速度でトンネルを通過したとしても、後続車は車間を拡げるために速度を下げなければならない。先頭車がトンネル内で減速をすれば、後続車の減速はさらに大きくなる。特に、車群の末尾に近い車ほど低下の度合いが大きく、車群が大きければ末尾の車が停止に至るのは、観測によってもしばしば見受けられる。

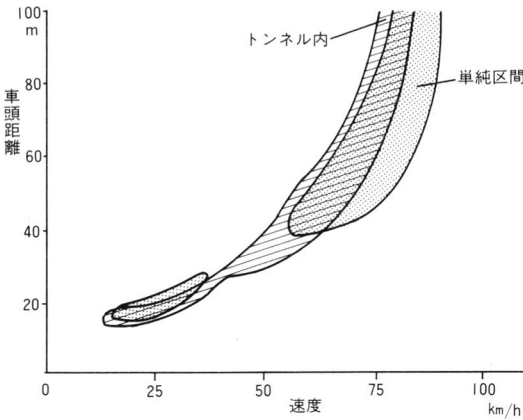


Fig. 4 小仏トンネル内外の車頭距離-速度
Spacing and speed inside and outside of Kobotoke Tunnel

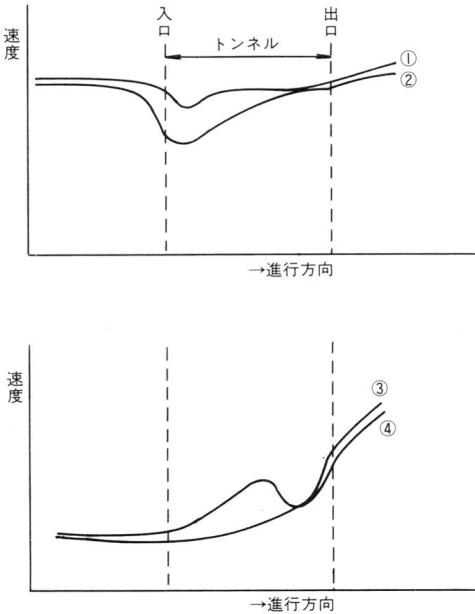


Fig. 5 小仏トンネル内速度プロフィール
Speed profile in Kobotoke Tunnel

Fig. 5 の曲線①は車群の先頭に近い車両、曲線②は後尾に近い車両の速度に対応すると考えてよいであろう。次の車群が到着する前に、この車群が通過してしまえば同様な現象が再び生ずるだけで、継続的な渋滞状態には至らない。しかし、もし次の車群が速度の低い前の車群の末尾に追いついてしまうと、この新たに到着した車群全体の速度がさらに低下して、渋滞状態の始まりとなる。

以上の説明は小仏トンネルでの観測をもとにしたものであるが、都夫良野、梶原でもフローティング走行調査の結果によれば、いずれもトンネル入口付

近で速度が低下し、渋滞が発生している。先に述べたように、これらのトンネルでの渋滞発生前の容量が似かよった値であることを考え併せて、各トンネルとも、渋滞発生のきっかけとしてはほぼ同様な現象が起きているものと考えてよいようである。

5. 渋滞中の車両挙動

いったん渋滞してしまっからの、渋滞中の交通容量は、渋滞先頭位置からの加速発達流率によって定まる。この加速発達位置、つまり渋滞先頭の位置はトンネルによって異なる。これについて最も複雑な現象を呈するのが小仏トンネルである。

Fig. 5 の曲線③は、小仏トンネルで曲線②の走行から10~20分ほど後の走行速度である。渋滞のために入口まで低い速度で走行し、トンネルに入っすぐ速度回復を始めるが、出口に至る以前に再び速度が低下する。この速度低下の場所は後続車ほど後方になり、従って、この減速波はゆっくり入口方向に後進し、ついには入口での低速部とつながる。

この状況を示したのが Fig. 6 である。これは120~160m 間隔でトンネル内に設置されている ITV カメラを使って、トンネルを通過する車を追跡したデータをもとに、各区間における10秒間平均走行速度を示したものである。斜線部は時速30km/h 以下の低速域であり、上に述べたように、これが後進する現象が読みとれる。

トンネル内部で減速が生ずる位置はほぼ決まっており、クレスト (縦断勾配が凸になっている部分の頂上) より少し手前の付近である。トンネル内での減速の発生・伝播が繰り返された後、最後に入口からこの地点までが低速域となって安定状態となる。小仏トンネルでは、Fig. 1 の㉔から㉖になり、安定するまで1~2時間程度かかるが、この時間がトンネル内で安定状態に落ちつくまでに対応している。このように内部で低速域の先頭が動くにつれて容量が低下し、トンネルの大部分が低速域になった状態での容量が2,200~2,300台/時・2車線となる。

Fig. 5 の曲線④はこの安定状態におけるトンネル各地点の走行速度を示したものである。入口付近まで約20km/h で走行し、そこからゆっくり加速を行い、クレスト手前で約40km/h になり、急に速度が回復する。

しかし、このような速度プロフィールが縦断勾配の故であるのか、あるいはたまたまクレストと一致しているのかについては確認がない。このように、

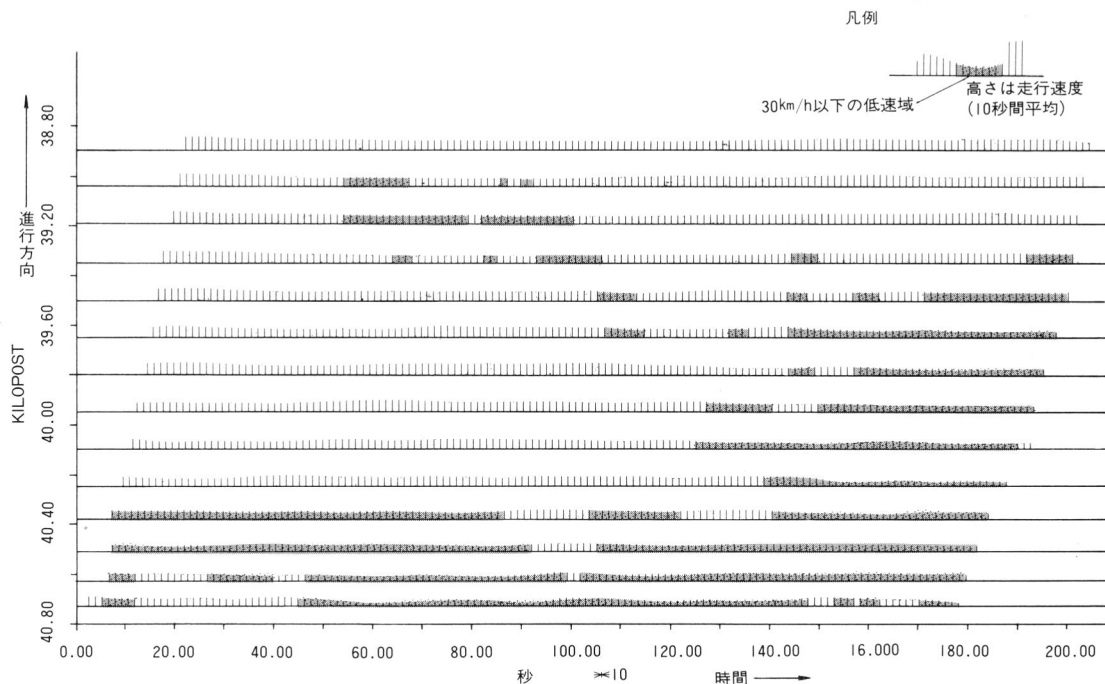


Fig. 6 小仏トンネル内低速域の移動
Motion of low speed traffic in Kobotoke Tunnel

小仏トンネルにおいて、トンネルに入って渋滞状態からいったん加速を始めたのに、そのままトンネルを通過できずに、トンネル内で再び減速を強いられるのは一体何故であるのかは、依然として興味深い謎である。

一方、都夫良野トンネルでの観測によれば、安定状態での低速部分は入口からせいぜい100~200m程度の所までであって、その先のトンネル内部では速度は70km/h程度まで上昇する。Fig. 3に示した交通量の時間変動においても、渋滞発生後に交通量が安定するまでの時間は短い。安定時の容量も小仏トンネルに比べて高い。また、小仏トンネルと同様に、大きな上り勾配のある日本坂トンネル (Fig. 2) でも、上り線でクレスト付近まで速度が低いらしいと言われているが、このトンネルは渋滞の継続時間が比較的短いので、詳しい調査が行われておらず、確かなことはまだ不明である。以上の例からすれば、低速域と勾配、加速発達流率、つまり交通容量と勾配との間には密接な関係がありそうである。

一方、明るさについては、先に日没と共に容量、速度とも上昇することがあると述べたが、相対的にトンネルが明るくなり、走りやすくなるためと考えてよいであろう。また、都夫良野トンネルで渋滞後

に入口部の照明を明るくしたら、入口部での走行速度が上昇したという報告もなされている。小仏トンネルでは、昨年の初めにやはり入口部照明を明るくしているが、速度上昇は見られなかった。明るさの増加量が十分でなかったのか、あるいは入口部の照明だけでは効果が小さいのかも知れない。都夫良野トンネルでは、入口部にしか低速域が現れないために、その部分の明るさの増加によって効果が見られたのに対し、小仏トンネルでは低速部の先頭がトンネル内部にまで達するので、トンネル全体にわたる増灯をしなければ効果が見られないのかも知れない。

小仏トンネルでは、昨年末に内部でも照明を増灯しているので、これからの渋滞シーズンには新たな事実が得られるであろう。

6. 渋滞への対応策とこれからの課題

ここでは、トンネルによる渋滞を軽減あるいは防止するための交通容量増大の方策について考えてみる。

まず、渋滞発生前と渋滞中は別々に考えなければならない。各トンネルの明るさ、勾配等は様々であるのに、発生前に見られる交通現象には大きな差はなさそうである。従って、少々の対策では発生前容

量は大きくは変えられないのかもしれない。

また、仮に少々上げ得たとしても、渋滞発生前の交通需要急増時にはあまり効果がない。しかし一方では、渋滞を起こさないトンネルも多く存在しているので、これらとの相違をさらに詳細に分析することによって、何らかのヒントが得られるかもしれない。おそらくは、トンネル内照度、トンネルの長さ、縦断・平面線形（勾配やカーブ）、さらにはトンネル手前の区間の縦断・平面線形および車線数（登坂車線の有無など）の組み合わせ条件によって、渋滞を起こしたり起こさなかったりするのであろう。渋滞の発生が大きな車群の到着をきっかけとすることから推して、キープレフト（追越時以外には走行車線を走る）を徹底させ、大きな車群が形成されにくいようにすることも効果がありそうに思われる。

渋滞中の交通容量については、トンネル内照度を工夫することによって、容量を上げ得る可能性は高いように思う。

また、トンネルへの到着交通量を上流で調節し、渋滞前交通容量を超えないようにすることができれば、その効果は大きい。問題はそのため的手段であり、既存の様々な手段ではうまく行きそうにない。

これに関して、興味深い事実がある。小仏トンネルの約2km上流には相模湖バスストップがあり、トンネルで渋滞して車列が延びると、警察による路肩走行取締りが行われる。そうすると、この取締り地

点がボトルネックとなって、その容量は小仏トンネルの渋滞中の容量より小さい。そのため、間もなくトンネルでは渋滞が解消する。その後、取締りが終了すると、今度はおそらく縦断線形に起因するボトルネックが取締り地点の近くに発生し、その容量は約2,600台/時・2車線である。この値が小仏トンネルの渋滞発生前容量3,000~3,200台/時・2車線より小さいために、この後はトンネルは非渋滞のまま約2,600台/時・2車線を流し続けるのである。

以上、トンネルで見られるいくつかの現象を述べてきた。本稿では天王山トンネルについては渋滞が発生するという事実だけを述べたが、ここは他と比べて側方余裕が小さく、他のトンネルと同列に扱おうことはできないかもしれない。このトンネルも含めて、より多くのトンネルで現象を観測する必要がある。

参考文献

- 1) 中央自動車道小仏トンネル付近（上り）交通渋滞調査報告書、日本道路公団、1981、2
- 2) 中央自動車道上り小仏トンネル交通容量改善に関する調査報告書、日本道路公団、1982、2
- 3) 東名高速道路都夫良野トンネル自然渋滞現象解析報告書、日本道路公団、1983、3
- 4) 名神高速道路交通渋滞状況解析報告書、日本道路公団、1983、3