

## 高速道路ボトルネックの交通容量改善策\*

## Measures for Improvement of Traffic Capacity at Bottlenecks on Motorways

栗原光二\*\*・日置洋平\*\*\*

By Koji KURIHARA\*\*・Youhei HIOKI\*\*\*

## 1. はじめに

わが国の高速道路の供用延長は平成7年3月末で計画総延長のほぼ半分に相当する5677kmに達し、ネットワーク化の進展と共にその役割は日々重要度を増しつつあるが、一方では高速道路単路部のサグやトンネルをボトルネックとする渋滞が増加の一途にあり、高速道路の運営にとって深刻な問題となっている。

この現象は1970年代の前半以前には見られず、高速道路の交通容量はHCM等に規定する値が確保されていると信じられていた。しかし、モータリゼーションの本格的到来によって東名や中央道においてボトルネック現象が頻発するようになり、高速道路はある条件下において著しく機能を低下させるという現実直面することとなった。

この片側2車線(往復4車線)高速道路のボトルネック現象に関する調査・研究は越ら<sup>1)</sup>によって1980年頃より始められ、現象分析に基づく幾つかの改善策提案がなされており、早急にそれらを検証する段階を迎えている。本論文は、その中の1つである付加車線の設置が大きな効果を発揮している事例について現象分析を行ったものである。

## 2. 都市間高速道路の交通特性と改善策の視点

これまでに確認された本線ボトルネックにおいては、一般に3100[pcu/h/2車線]程度の交通量がこの地点に到達すると減速波が発生するようになり、し

ばらくしてこれを先頭とする渋滞流が形成されると、そこからの流出率は表-1に示すように2700[pcu/h/2車線]<sup>2)</sup>程度になってしまう。これはHCMなどに規定する基本交通容量4000[pcu/h/2車線]の67.5%に当たり、また我が国の都市間高速道路の可能交通容量と考えられる3600[pcu/h/2車線]と比較しても75%に過ぎず、ボトルネックを抱える高速道路区間では交通容量の25%が消失していることになる。

ボトルネックとなるサグとトンネルとでは後で述べるように渋滞発生機構の一部が異なるが、ボトルネックの形成に係わる要因は道路側のみにあるのではなく、走行するドライバーの利用のしかたに極めて強く依存している。一般に単路部では3600[pcu/h/2車線]が実現するが、そのとき追越車線にはその60%強に相当する2100~2200[pcu/h/1車線]が偏在しており、このことがボトルネック形成の第一の原因を成している。すなわち、この2100~2200[pcu/h/1車線]は都市間高速道路において実現する最大の値に相当するが、これを通すことができない地点においてはその超過分が積み残されてしまい、その地点の上流側に待ち行列を成すことになる。<sup>1)</sup>

表-1 主なボトルネックの渋滞後の交通容量<sup>3)</sup>

| 渋滞要因 | 路線 | 上・下 | 地名<br>キロポスト | 延長<br>(km) | 勾配<br>(%)    | 2車線合計<br>(pcu/h) |
|------|----|-----|-------------|------------|--------------|------------------|
| サグ   | 中央 | 上   | 相模湖 (43)    | —          | -3.5 ~ +4.5  | 2,600~2,800      |
|      |    | 下   | 鶴川 (52)     | —          | -0.3 ~ +5.0  | 2,500~2,700      |
|      |    | 上   | 中野橋 (61)    | —          | -3.2 ~ +3.7  | 2,600~2,700      |
|      |    | 上   | 中井 (53)     | —          | -3.4 ~ +4.8  | 2,500~2,700      |
|      |    | 上   | 伊勢原 (44)    | —          | -0.3 ~ +1.4  | 2,500~2,700      |
|      |    | 上   | 秦野 (47)     | —          | -2.6 ~ -0.3  | 2,500~2,800      |
|      |    | 下   | 秦野 (47)     | —          | +0.3 ~ +2.6  | 2,500~2,700      |
| トンネル | 中央 | 上   | 小仏 (41)     | 2.0        | +3.2 ~ +3.0  | 2,600~2,700      |
|      |    | 上・下 | 日本坂 (170)   | 2.0        | +0.1 ~ +2.5* | 2,700~2,800      |
|      |    | 上・下 | 天王山 (47)    | 1.45       | +4.6 ~ -0.9* | 2,900~3,000      |

\* 上り線の勾配

\* キーワーズ、交通流、交通容量

\*\* 正員、工修、日本道路公団試験研究所  
(東京都町田市忠生1-4-1)

TEL 0427-91-1621, FAX 0427-91-3717)

\*\*\* 工修、日本道路公団東京第一管理局  
(神奈川県川崎市宮前区南平台1-1)

TEL 044-877-4181, FAX 044-866-3521)

そしてこの超過車両の一部は、より低密度の走行車線へ進路を変える為に、殆ど同時に走行車線をも渋滞流へと変えてしまう。すなわちこの地点がボトルネックということであるが、これまでの観測によると、ボトルネックでは渋滞発生前に追越車線で1850[pcu/h/1車線]が限度であり、これに相当する2車線合計の交通容量が前述の3100[pcu/h/2車線]ということになる。

ボトルネック現象はこのように追越車線から変状を来すものであり、一般単路部との差は追越車線において、ある一定の交通密度に耐えうるか否かの違いであると捉えることもできる。一般単路部では、通し得る高密度の流れがボトルネックに到達すれば、そこで通過可能な交通密度へと調整が行われ、それによって滞留車両が発生し渋滞に至る。したがってボトルネックを通過する際の追越車線上の交通量が1850[pcu/h/1車線]以上とはならないように交通流を整形し、なおかつ2車線合わせて3600[pcu/h/2車線]を通すことができれば、ボトルネックを顕在化させずに済むことになる。

### 3. ボトルネックの生成

#### (1) 渋滞発生への過程

以上のように、ボトルネックにおいて通し得る最大交通量は、一般単路部に比べてかなり劣るが、渋滞後の交通容量は表-1に示すように更に低い値となる。この隘路現象は事故や故障車といった外部からの支障要因によるのではなく、ドライバーの普通の挙動の集積として交通流の内部で生成されるものである<sup>1)</sup>。その過程をこれまでの観測や調査・分析の結果<sup>2)</sup>に基づいて整理すると次のようになる。

##### a) 「追越車線への偏り」

交通量が増加してくると車線間の速度差が原因となって、追越を終えた車両が走行車線へ戻らずそのまま追越車線を走る為に、その利用率は60%を越えるほどになる。

##### b) 「車群の形成」

単路部走行が長くなり、追越車線に交通量の大半が偏するようになると、その中の比較的遅い車両が先頭となる車群が形成され、車群間に大きな空きを作ると同時に、車群内は過密な追従走行状態とな

る。

##### c) 「速度低下」

サグの場合、走行抵抗が弱から強へと変化するが、車群の中を走るドライバーは視覚的にその変化を察知することが困難になり、速度を一定に保つ為に必要なアクセルの踏み込みが遅れ、僅かに速度低下を引き起こす。トンネルの場合には、明かりとトンネルとの環境の違いが原因となって、明かりで確保してきた車頭間隔よりも大きな車頭間隔を望むために、車群内を走行する車両は速度低下を引き起こす<sup>1)</sup>。

##### d) 「減速波と渋滞流」

速度低下した車両の後方車両は、それまでよりも縮まる車頭間隔に反応し減速を余儀なくされるが、これは反応時間の遅れを伴う“減速波”として車群内を伝わる為に、減速量は後方へ向かって増幅される。その結果車群の後尾車両は停止に至るほどの低速となり、後方の車群を次々と併合して巨大な車群へと成長すると同時に、車頭間隔は極端に詰まり、身動きのとれない“渋滞流”へと変わる。

##### e) 「走行車線への伝搬」

追越車線で減速波が後方へ伝搬する間に車群後尾が低速になり、追越車線上の走行速度が優位で無くなると、より低密度の走行車線側へ車線変更が行われて、両車線共に高密度・低速の渋滞流となる。

##### f) 「発進交通流」

このように極端な低速と化した渋滞流は、ボトルネックを過ぎ下流へ進むにつれて徐々に速度を上げ、ついには自由流へと回復するが、この流れのプロファイルを描くと、あたかもこのボトルネックをスタート地点とするような流れ、すなわち“発進交通流”を形成する(図-1)。

この時の交通容量が表-1に示す値であり、サグ・トンネルの区別無くほぼ一定になっている。これ

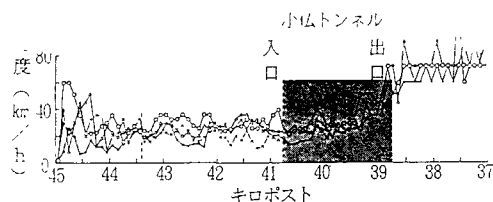


図-1 小仏トンネルの速度勾配

は、渋滞の中での走行は先行車を追い越す見込みがなく、前車が進行して車間距離が開くのでそれにつられて後れて発進する“負圧の流れ”<sup>1)</sup>になることと無縁ではなさそうである。

そして、一旦このような発進交通流が形成されてしまうと、待ち行列の車両数がそのまま渋滞の長さを規定してしまうので、需要交通量がこの交通流率を上回る間は渋滞は増大し続け、下回ったときに初めて減少に向かう。

## (2) トンネル

一般にドライバーがトンネルへ進入しようとする際には、明かりとは異なる閉塞空間に対する不安からアクセルを緩め、また追従走行中に明かりでは維持可能であった短い車頭間隔が保てなくなり、より長い車頭間隔をとる傾向が見られる。この2つの行動特性によって車群の先頭部は速度低下を引き起こし、それは車群内でショックウエーブとなって後方へ増幅・伝搬される。

図-2 は平成6年1月3日の中央道上り小仏トンネル付近における交通量と速度を時系列でみたものである。ボトルネックとなるトンネル入口(40.4kp)においては交通量の増加によって速度低下が幾度か繰り返されている。それが車群内で納まらなくなる11:00頃になって、その上流の(41.2kp)地点へ減速波が到達してしまい、この間の全域が時速30km以下の本格的な渋滞流になってしまう。

ここで交通量は渋滞直前の260[pcu/5分/2車線]から渋滞後の230～220[pcu/5分/2車線]へと減少している。この後者がボトルネックからの発進交通流率であり渋滞後の交通容量である。一方、速度は約1.7km下流の(38.7kp)地点で漸く65km/hに回復しており、発進交通流の加速度がいかに緩慢であるかを表している。

また、トンネル内の明かるさが外に比べて優位になる日没後に、発進交通流率が増加することが観測されている。夜になってトンネル内の暗さがドライバーにとって障害で無くなり、前車との位置関係や相対速度が確認し易くなると、発進時の車頭間隔がそれまでより縮まり高密度が実現すると考えられる

<sup>3)</sup>。

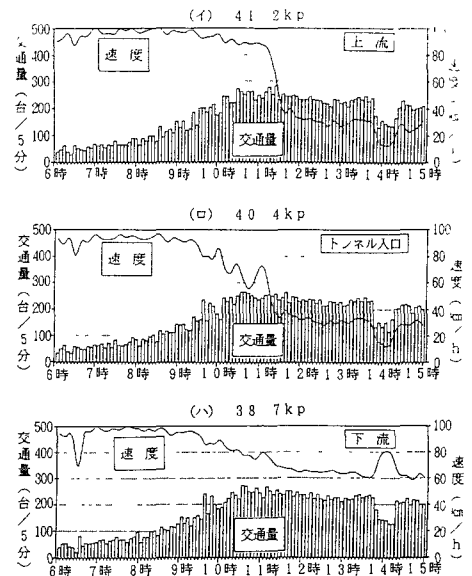


図-2 5分間交通量と速度図

(小仏Tn 上り 平成6年1月3日)

## (3) サグ

サグは縦断勾配の変化点に生じる道路の凹部の底部である。サグの底部へ向けて進むときは、重力の援助を受けて走行抵抗が小さくなる為にアクセル操作は緩やかで済むが、底部から先ではアクセル操作を怠ると速度は自然に低下するという力学的特性がある。ここではトンネルのときのように、車頭間隔をより大きく取ろうという挙動では無く、サグに用いられる縦断曲線の接線角が進行方向へ徐々に小さくなるので、速度補正が追いつかないまま速度低下を招いてしまうことが重要な要因として挙げられる<sup>3)</sup>。追従走行を強いられるドライバーは速度の変化よりも車間距離の変化により敏感に反応する為に、低下した速度に見合った交通密度への補正が困難となり交通容量の低下へと向かう。交通密度が一定のまま速度が低下したときに、交通流率がどの程度低下するかの試算を以下に示す。

交通状況を単純化して、例えば平均車頭間隔25mの交通流が平均速度40km/hで流れるときと、35km/hのときとを比較すると、これだけで400台/hの差が生じてしまう。

$$1,000/25 \times 40 \times 2 = 3200 \text{ 台/h/2車線}$$

$$1,000/25 \times 35 \times 2 = 2800 \text{ 台/h/2車線}$$

ボトルネックとなるサグの特徴は、走行抵抗の大きさもさることながら、ドライバーから見てその存在の認識が困難であったり、縦断曲線長が長すぎてアクセルを強く踏むポイントが明確でないなど、ドライバーの多くが無意識のうちに速度低下に陥る線形要素を備えていると考えられる<sup>3)</sup>。

4. 付加車線による改善効果

(1) 4車線高速道路における車線利用率の実態  
図-3は東名高速道路上り大井松田ICの約2.5km下流地点[54.58 kp]における各交通量ランク毎の車線利用状況を表したものである。当該地点の車両感知器で測定した1991年7～12月間の半年分の時間交通量の中から休日分を取り出して100台単位に区分けし、その時の各車線の交通量を平均して車線利用率を求め、その中から400台毎の代表的なランクについて、両車線の分担交通量を表示した。ここで休日に限定したのは、ボトルネック現象が起きるには休日であり、車種構成は乗用車が殆どでデータの取り扱いが容易であることによる。

これによると、交通量が少ないときには走行車線の方がよく利用されるが、交通量が増加するにつれて追越車線へ重心が移り、最大値に匹敵する3600[pcu/h/2車線]になると追越車線の利用率は60%にも達し、車線間の交通量の差は700台もの大きな開きが生じてしまう。すなわち一方2車線の高速道路の場合、走行車線は追越車線との間に大きな利用格差を生じたままであり、本来の機能を発揮する機会を得ることがないのである。

また速度については、5分間値を用いて交通量と速度の関係を求めたが、左縦軸に示す5分間交通量に相当する速度の平均値が車線毎に示してある。これによると車線間で10～20km/hもの差が生じている

ことが分かる。本来ドライバーの希望速度はかなり広範囲に分布するが、それを車線数の制約から2つの車線に仕分けしようとする、交通密度・希望速度およびキープレフトの原則などが相互作用した結果として実勢速度が形成される。一般に低交通量の時の速度は各ドライバーの希望が反映され易く、交通量が多くなって来ると前方車両に干渉を受けることになるが、上記の各交通量ランク毎の車線利用率の差は、より希望速度が実現する方を選択するドライバー特性が原因を成すと考えられる。

(2) 車線利用率改善への提言

4車線高速道路の各車線は均等に使用されておらず、交通容量状態に近づくとも必ず追越車線側には60%を越える負担がかかることを図-3を例に挙げて示した。これは高速走行を指向するドライバーの割合

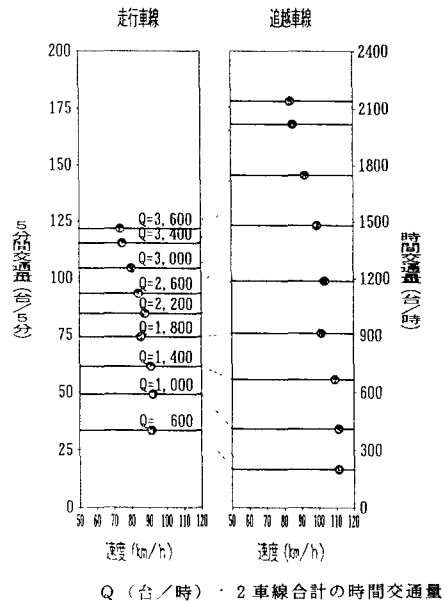


図-3 大井松田IC付近の車線利用状況  
(日曜・休日自由流のみ  
(上り54.58kp 1991.1～12))

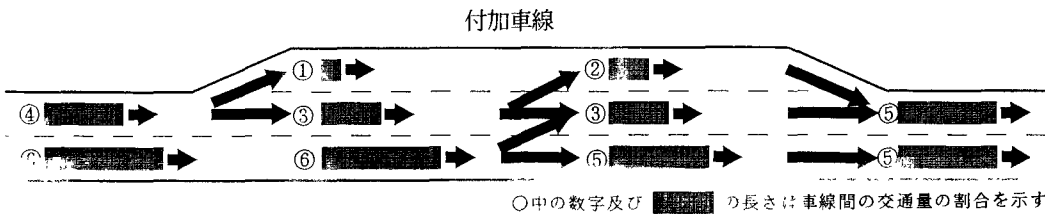


図-4 付加車線区間における車線利用の遷移パターン

が卓越することに起因している為に、車線間に速度差が存在する限り消し去ることのできない属性である。これは限界状態に至るまで継続され、結局渋滞して車線間の速度差が無くなって初めて均等化するのである。このことはボトルネック対策を考えていく上で重要な示唆を与えてくれる。何故なら、すでに満杯状態に近い追越車線において、その限界車頭間隔をより小さくすることの難しさに比べれば、十分に余裕のある走行車線を有効に活用することの方が可能性が高く現実的だからである。越の提案<sup>3)</sup>は、

- i) 追越車線に交通量を偏在させないように、かつ大きな車群として流すことのないように、追越しが終了したらすぐに走行車線に戻るという、いわゆるキープレフトのマナーを徹底させること
- ii) リンカーントンネルで実施されたように、ボトルネックにさしかかる交通の量または密度がある限界を上回らないように、上流地点で流入交通量をコントロールすること

としており、それを実現する具体的手法として付加車線の設置を推奨している。また同時に、中央道（下り）鶴川大橋の下流に設けられている登坂車線が

この付加車線の役割を果たしていないのは、サグの底部を過ぎてかなり上った所に設置されていることが原因であることを指摘しており、付加車線の設置場所はサグの底部を含む上流側が望ましいとしている。

今までのところ、この提案に基づいてサグやトンネルの手前に付加車線を設置した事例はないが、それを実証する手法として6車線への改築事業区間の供用を一部前倒しし、試行的に運用してみるのが最も手近な手法であると考えられる。この段階で筆者らが予測していた付加車線区間での車の流れを模式的に示すと図-4に示す通りである。本線に並行する新たな通行帯の提供は交通流に変化と刺激を与え、それによって車群の解体と流れの再編を誘導し、流れの活性化が図れるであろうというものである。

東名高速道路大井松田ICにおいて、上りの加速車線を延長しその先の登坂車線と連結する工事が平成2年6月末に完了した。これまで1年間に100回を越す渋滞のボトルネックとなっていたのは57.3kpに位置するサグである。渋滞発生後のICからの合流をより円滑にするために加速車線を延長したところ、先の登坂車線と繋がってしまい、結果として1.8km

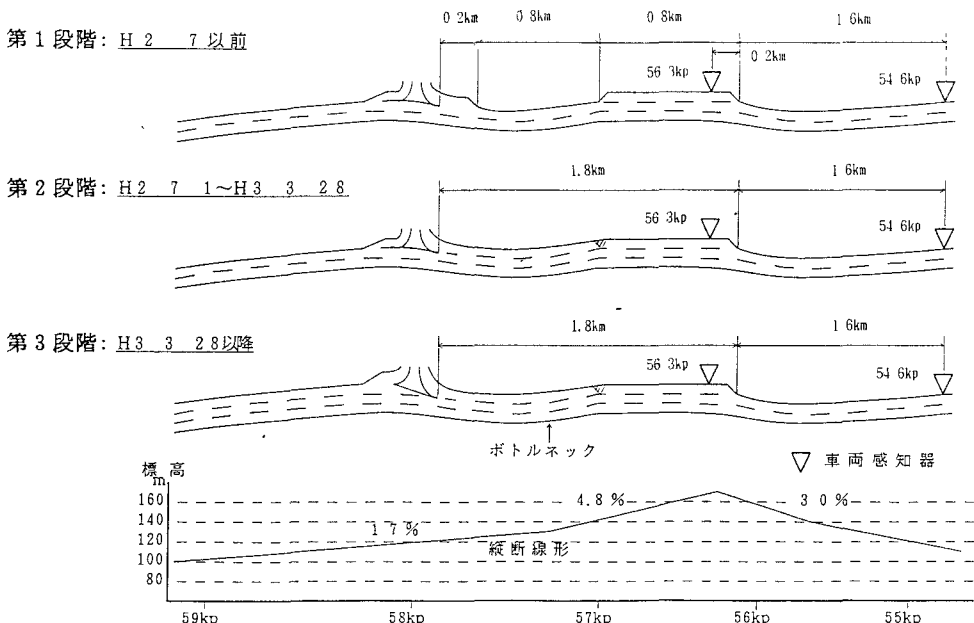


図-5 大井松田IC付近の幾何構造と車線運用の経過および車両感知器設置位置

の付加車線が生じたものである。その結果渋滞の発生が劇的に減少したとの事実に基づいてその原因を分析したところ、付加車線の効果と思われる事実が判明した。

### (3) ボトルネックの解消

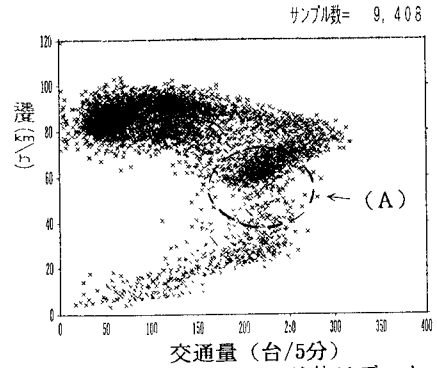
図-5は大井松田IC上り直下流付近の幾何構造と車線運用の経過、および車両感知器の設置場所を表している。そして図-6はそれぞれの段階における半年間の5分間データによるQV図である。第一段階のQV図においては(A)で示した部分に、上流から発進交通流が通過した痕跡が見られるが、第二段階および第三段階には全く姿を消している。これは、このQ-V図の計測点56.31kpの上流側にそれまで存在していたボトルネックが消滅したことを意味している。そして、このことは前述のように年間100回もの発生が報じられていた57.3kpを先頭とする渋滞が、その後全く確認されなくなったことと符合する。

それに代わって第二段階以降のQV図の(B)に示した所に渋滞流の急激な増加が見られる。57.3kp付近のボトルネックでは、これまで流し得なかった交通量が下流へ流れるようになった為に、下流のボトルネックがより顕在度を増したことによる。そして、各段階のQV図の交通量の最大値を見ると段階が進むにつれて増加しているが、そのときの速度が示すように自由流状態での交通量増加であることに注目する必要がある。

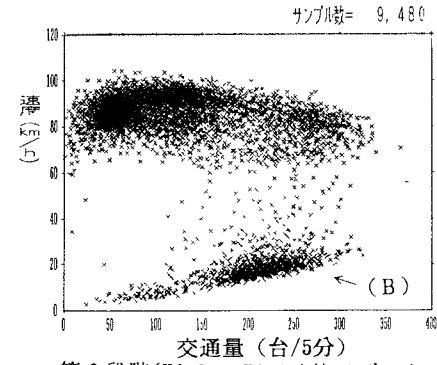
ここで第三段階は大井松田～御殿場間の改築事業が完了し、上り方向が3車線になり需要交通量が伸びると同時に交通容量が増加した状態を表している。

### (4) 付加車線の役割と効果

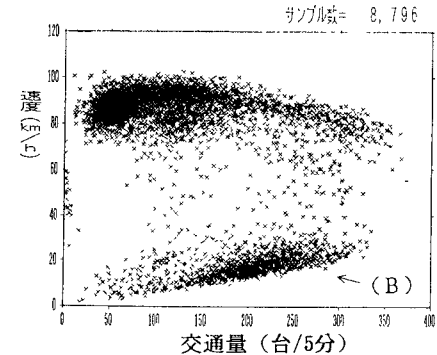
4の(3)で述べた付加車線の効果の中で、より多くの交通量を通し得るようになった状況および付加車線の役割をより鮮明に表現する為に、同じデータから車線別交通量を抽出してその最大値を比較したのが図-7である。この最大時間交通量は、年々4~6%増加しているが、この間の日交通量の伸びが1~2%であることから、需要交通量の変化とともに交通容量の増加を反映したものと考えることが出来る。



第1段階(H1.7 ~ H1.12)休日データ



第2段階(H2.7 ~ H2.12)休日データ



第3段階(H3.7 ~ H3.12)休日データ

図-6 大井松田IC付近のQ-V図  
(上り56.31kp 2車線+1)

図-7で興味深いのは、交通量の増加分は付加車線と走行車線とで受け持っており、追越車線の交通量は寧ろ減少していることである。このことは、第二段階以降1.8kmの付加車線が完備したことによって走行車線上の低速車の付加車線への移行が促され、その結果走行車線上の速度差により生じるバラツキのある空間が均一化して、高い交通量が実現可能

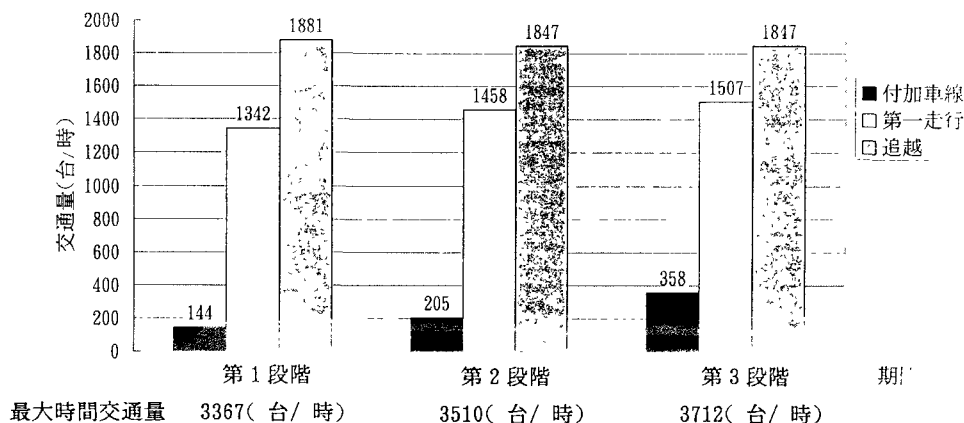


図-7 上り56.31kpの最大時間交通量時の  
車線別交通量経年比較

となったためである。それを受けて、追越車線は過飽和になる一歩手前で自由流が維持され、減速波の発生・伝搬から免れていると考えられる。

一方、一般に懸念される付加車線と走行車線との合流部での交通容量低下に関する問題は、QV図や渋滞記録などからみて当該地点の交通流を阻害する要因にはなっていない。そして第三段階において、合流する2車線の合計交通量の最大値(1865[pcu/h])が追越車線の最大値に達していることから、合流直後は各50%という理想的な車線利用率が実現しており、現在のところこれがボトルネックでの最大能力状態として位置づけられよう。

#### (5) 考察と今後の課題

これまで述べてきたように付加車線が果たす役割は、走行車線上の交通量の一部をこの空虚同然の車線へ導いて、まず一旦走行車線上を低密度にすることにある。それによって走行車線上は、

- ①追越車線との速度差が小さくなる
- ②追越車線からの車線変更の為のスペースが多くなる

など、追越車線からの車線変更の受け皿としての条件を整える。それによって追越車線上の交通量の一部が走行車線への移行を促され、その結果として追越車線上の健全度が保たれる、と考えることができる。そして付加車線の終点付近では、1車線への絞り込みが交通容量に近い状態ながらも円滑に行われ、

その後はボトルネック区間から脱出して一般単路部の平然とした交通流へと戻るのである。

当然のことながら、交通は移動する車の連なりという意味では流体の一種であり、その円滑な流下を実現することが高速道路運営の基本と言える。各地点の交通容量が常に上流側の一般単路部と同等以上の値を持つならば、ボトルネックは存在しないのであり、上流よりも交通容量の小さな箇所が存在しているならば、何らかの方法でそれを補強する措置を講ずる必要がある。ここでは付加車線という補助手段によって隘路箇所を補強することが可能であることを示したが、これが最良の方法であるかどうかは今後の研究に待つほかない。しかし、手法として極めてわかり易くかつ簡便であることから、現実的な対策手法としてその機能の詳細な分析が求められよう。そして、更にこの手法の汎用性を整理して行く上で、次の諸点が課題として挙げられる。

- 1) 適正な車線利用率を実現するには付加車線の設置場所及び延長はいかにあるべきか。
- 2) 車線利用率の是正効果は下流側のどの範囲まで維持されるのか。
- 3) 小仏Tn下りの分析では付加車線の効果はほぼ立証されつつあるが、現実にボトルネックとなっているトンネルにおいて有効か。
- 4) 4車線高速道路以外の他の車線数のケースでは有効に機能するか。

これらの命題について、様々な現象のデータの蓄

積や分析を行って研究を進めて行く必要がある。

## 5. おわりに

高速道路の単路部は、安定した均一な交通流を確保する為に設計速度に基づいた滑らかな線形を採用し、幾何構造上の変化は極力小さくなるように配慮して設計されるが、大局的には地形に調和した線形とならざるを得ないことから、交通容量を道路の全区間にわたって均一にすることは至難の業である。道路延長上の各ポイントの交通容量は、ドライバーの運転特性とも絡んでそれぞれ固有値を持っていると考えるべきであろう。そういう観点から道路の機能をいかに高く保つかという目標に向けて常に交通現象分析を行い、この固有値を点検・把握し、平均的な一般単路部との比較においてそれを確認することが肝要である。

本論文ではボトルネックが解消した唯一の事例をもって、この難解な現象が解決不可能では無いことを示したが、交通容量状態に近づいたときの交通現象は極めて煩雑な内容を内蔵しており、今後様々な形となって出現してくる可能性が十分あることを覚悟して置かねばならない。

## 参考文献

- 1) 越 正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集、第371号/ IV-5 pp. 1～7, 1986年7月
- 2) 栗原光二・日置洋平：4車線高速道路の交通実態と交通容量改善策，土木計画学研究・講演集No.17，pp. 563～566, 1995年1月
- 3) 越 正毅・桑原正夫・赤羽弘和：高速道路のボトルネックにおける渋滞現象に関する研究，土木学会論文集、第458号/ IV-18, pp. 65～71, 1993年1月

## 高速道路の交通容量改善策

栗原光二・日置洋平

わが国の高速道路は平成7年3月末での供用延長が約5,677kmに達し、ネットワークの形成が進むとともに、その重要性を増してきている。しかしその一方、道路構造のサグやトンネルをボトルネックとする渋滞が頻発するようになり、高速道路としての機能低下が深刻な問題としてクローズアップされてきている。

本論文では、ボトルネック現象の端緒となっている非効率な車線利用状況に焦点を当てて、その是正が実効に結びついた事例をとらえ、極めて難しいと考えられているボトルネック渋滞の解消の可能性を示している。

## Measures for Improvement of Traffic Capacity at Bottlenecks on Motorways

By Koji KURIHARA and Youhei HIOKI

Motorways in Japan have been completed about 5,677km in total service length as of the end of March, 1995, and they become more important as the road network is formulated. Meanwhile, traffic congestion often take place at bottlenecks such as sags in vertical gradient and tunnels, and this is now highlighted as a serious problem which may deteriorate the inherent function.

This paper presents an example of successful measures to improve the traffic capacity, focusing on the ineffective lane use which may cause bottlenecks. It also suggests the possibility to solve the traffic congestion at bottlenecks, considered extremely difficult.