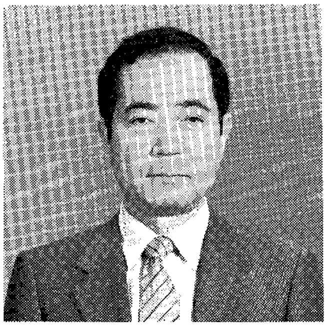
【土木学会論文集　第371号／IV-5　1986年7月】

招待論文

高速道路のボトルネック容量

CAPACITY OF MOTORWAY BOTTLENECKS

越　正毅*
By Masaki KOSHI



1. ボトルネックになるトンネルおよびサグ

都市間高速道路のトンネルやサグ（縦断線形の凹部の底部）を頭にして，交通渋滞が発生することがこの数年来明白になってきた．

トンネルやサグが交通容量上のボトルネックになり得るということは，つい最近まで，道路工学的にも交通工学的にも認識されていなかったことである．世界のどんな教科書にも，HCM（Highway Capacity Manual）にもこれについては書かれていない．しかし，今となって思い起こしてみると，ニューヨークのリンカーントンネルにおけるトンネル中央部（サグ）での渋滞[2]はここにこれから述べようとするサグでの渋滞現象であった可能性が大きい．

表―1および**表―2**は，東名および中央の各高速自動車国道においてこれまで渋滞が発生したことのあるトン

表―1　中央自動車道および東名高速道路においてボトルネックとなっているトンネル

道路名	上り下り	トンネル名	延長 (km)	勾配 (%)	平面曲線 R (m) (+は右まわり)	渋滞後の容量 台／時・2車線合計
中央	上	小　仏	2.0	+3.2～−4.0	+5 000	2 200～2 300
〃	〃	大　月	0.5	−0.6	+2 500	2 200～2 400
〃	下	〃	0.47	+0.6	−2 500	測定数少ない
東名	上	日本坂	2.0	+2.5～−1.8	∞	約 2 700
〃	〃	都夫良野	1.66	+0.5～−1.7	∞	2 400～2 700
〃	下	日本坂	2.0	+1.8～−2.5	∞	2 600～2 700
〃	〃	都夫良野	1.69	+1.7～−0.5	∞	2 400～2 700

* 正会員　工博　東京大学教授　生産技術研究所
（〒106　港区六本木7-22-1）

表—2 中央自動車道および東名高速道路においてボトルネックとなっているサグ

道路名	上り 下り	地　名	キロポスト (km)	勾　配 (%)	渋滞後の容量 台／時・2車線合計
中央	上り	相模湖バスストップ	43.5	−3.5～＋4.5	約 2 600
〃	〃	猿橋バスストップ	65	−1.3～＋2.5	測定なし
〃	下り	元八王子	32	＋1.0～＋2.7	2 500～2 700
〃	〃	鶴　川	52	−0.3～＋5.0	2 500～2 700 (測定数少ない)
東名	上り	中　井	52	−3.4～＋4.8	測定なし
〃	〃	松　田	57.3	−4.8～−1.7	〃
〃	下り	秦　野	47	＋0.3～＋2.6	2 500～2 700

ネルおよびサグを列挙したものである．これらは，少なくともボトルネックとして道路公団職員が視認したものであって，これ以外にボトルネックが存在しないということを意味しているわけではない．

表—1 および表—2 に示されるように，これらのボトルネックの交通容量（渋滞後）は，2車線合計で 2 200～2 700 台／時程度であり，これまで信じられていた可能交通容量 4 000 台／時（2車線合計）と比べると 6 割前後に過ぎない．一体なぜこんなことが起きているのであろうか．

この問題の実用上の要請は，

① 今後建設するトンネルやサグがボトルネックにならないようにするにはどうしたらよいか

② すでに出来上がっていてボトルネックとなっているトンネルやサグの容量を増す方法はあるか

の 2 つである．

少なくともいえることは，この隘路現象は事故や故障といった外部からの支障要因によらず，運転者達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ということである．運転者の挙動，ことに追従走行挙動についてはこれまで多くの実験や数学モデルの提案がなされてきたが，ここで述べるような隘路現象を説明できるものはなさそうである．本稿では，隘路現象としてこれまで観測された事柄の要点を紹介し，加えて運転者の追従挙動についての仮説を提示することとしたい．

2. 観測された交通現象

(1) 概　　要

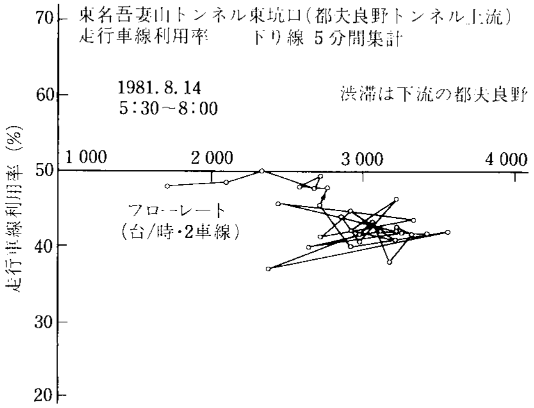
いずれのボトルネックにおいてもほぼ共通した状況がみられる．

自由流状態（臨界密度以下の流れ）で交通量が徐々に増加するにつれて追越車線を走行する車両の割合が高くなり，しかも大きな車群をなして走行するようになる．これは追越車線を慢然と，あるいは意図的に比較的低速で走り続ける車両のために，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に成長してしまうことによっている．車群がサグの先の上り勾配あるいはトンネルの入口にさしかかると，追越車線の車群の中に減速波が発生して，後方に増幅伝搬し，車群が大きい場合には後尾車はついに追越車線上で停止あるいは徐行するに至る．

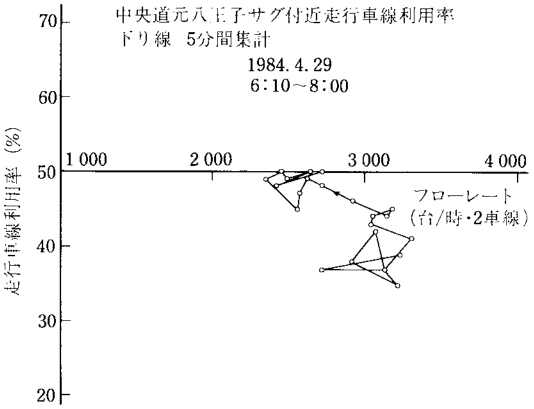
交通量が少ないうちは大きな車群が少なく，停止や徐行も生じにくい．仮に停止や徐行が生じても次の大きな車群が到着する前にこれらの車は再び動き出してしまうので継続的な渋滞には至らない．

交通量が 3 000 台／時（2車線合計）程度になると，先行の車群の末尾が動き出す前に後続の大きな車群が到着する確率が高くなって，この水準の交通量状態はあまり永続せず，数十分を経ずして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いる車両の多くは，前方の減速波をみて走行車線に車線変更をし，このために走行車線もほとんど同時に停止ないし徐行状態に陥る．この後十数分ないし数十分の過渡期間を経て，安定渋滞状態に至る．この状態ではボトルネック地点（サグあるいはトンネル入口）まで約 20 km/h で走ってきて，ここから緩慢な加速をし，かなり下流地点に至って 70 km/h あるいはそれ以上の速度に達して，運転者はいつの間にか渋滞を抜け出したことに気づく．

このような安定状態における交通容量は，ボトルネック地点からの緩慢な加速での流出率で定まってしまっており，この流出率の値が表—1 および表—2 に「渋滞後の容量」として示されるものである．場所によって異なるが，小仏および大月トンネルを除いておおむね 2 600 台／時（2車線合計）前後である．小仏および大月トンネルでは，これよりやや容量は小さいようである．いず



図—1　交通量と車線利用率（1）[3]



図—2　交通量と車線利用率（2）

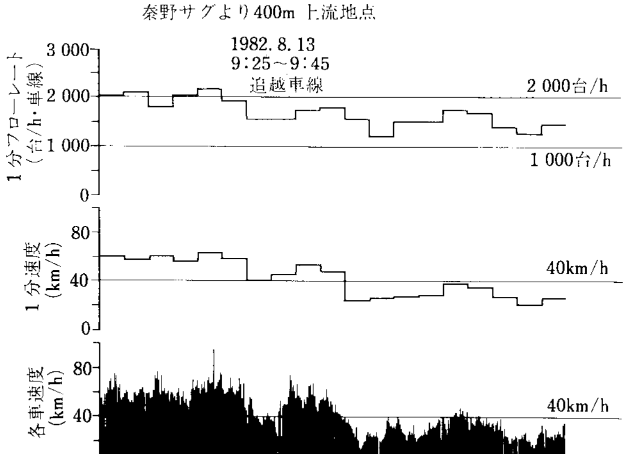
れにせよ，渋滞前の容量である約3 000台／時と比べれば渋滞後の容量は明らかに小さい．

（2） 交通量と車線利用率

図—1は，東名都夫良野トンネルの入口（実際には直近上流にある吾妻山トンネルの入口）において，都夫良野トンネルを頭にする渋滞が発生する前後にわたって，5分間交通量と車線利用率を示したものである．フローレートで約3 000台／時（2車線合計）前後で走行車線利用率が約40 %という状態がしばらく続いた後，交通量が急減し，走行車線利用率はほぼ50 %に急変して渋滞状態に陥ったのが認められる．

図—2は同様の事柄を中央道元八王子サグについて示したものである．

他のいくつかのボトルネックについても同様の調査結果が得られている．図—1および図—2は最も顕著な傾向の認められる例として示したものである．

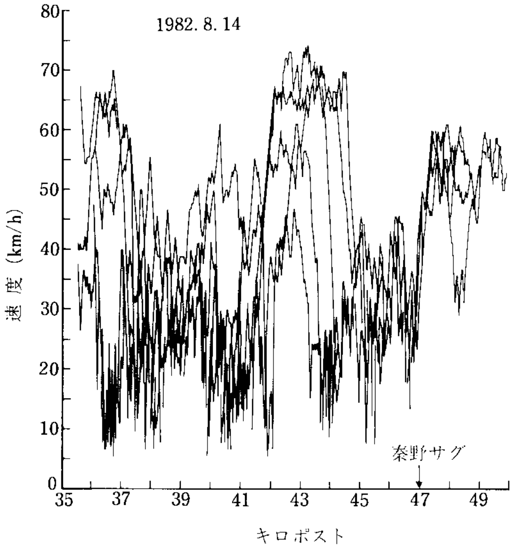


図—3　秦野サグ400 m上流地点における渋滞直前後の交通量と速度

（3） 追越車線の交通量と渋滞発生

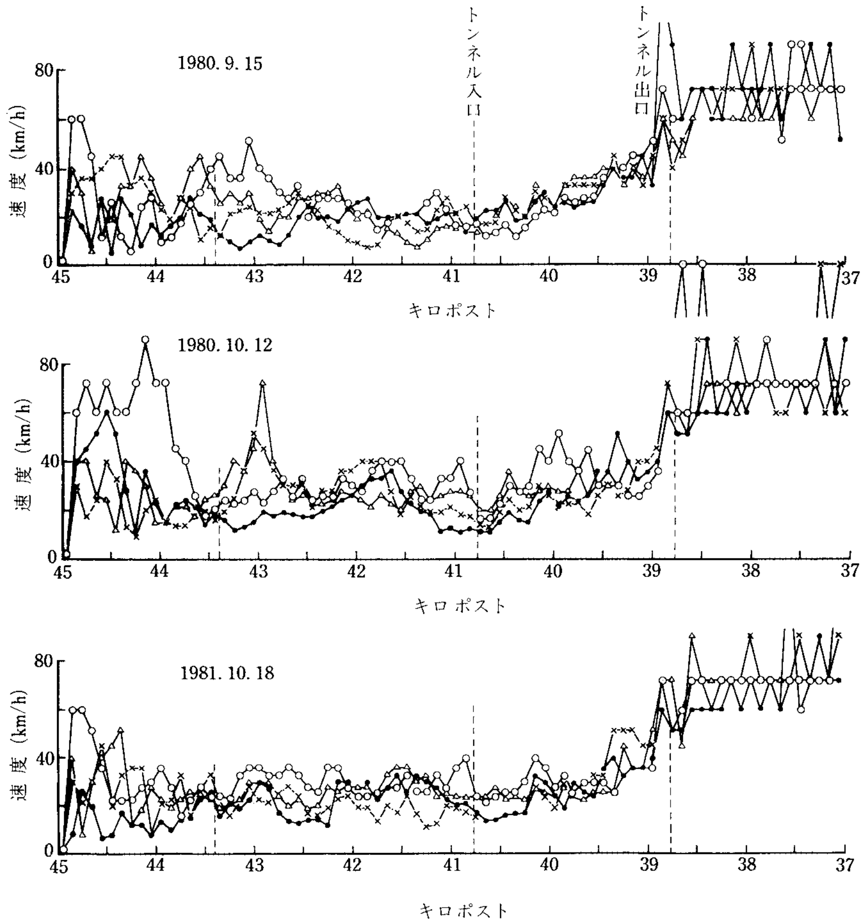
図—3は東名秦野サグの上流400 m地点における，渋滞発生直前後の追越車線の1分間交通量，1分間速度，および各車速度を示したものである．時間率でいって1車線当たり2 000台／時を超えるフローレートが渋滞前には出現している．このことから，2車線合計では3 000台／時程度で渋滞に陥って容量が低いようにみえるが，追越車線だけでみれば2 000台／時を超えており，格別に容量が低いとはいえないことがわかる．

（4） 緩慢な加速



図—4　秦野サグからの加速速度勾配（5回の走行を重ねて示す）

ボトルネック地点からの流出加速はきわめて緩慢である．図—4は東名秦野サグからの加速流の速度-距離の関係を示す．5回の試験車の速度記録を重ねて示してあるが，サグからほぼ



図—5　小仏トンネル加速速度勾配（数回の走行を重ねて図示してある）

60 km/h に加速するまでの間は 5 回ともほとんど同様な速度プロファイルを示しており，加速パターンが安定していることを示している．サグでの 20 km/h 強から 60 km/h 弱までの約 35 km/h の加速をするのに約 800 m を要している．

この加速時の速度プロファイルはボトルネックによってかなり大きく異なっている．たとえば図—5 は小仏トンネルにおけるものである．同じ日の何回かの測定はもちろんのこと，異なった日に得られた速度プロファイルの測定値も互いによく似ており，この加速パターンが安定していることがわかる．この場合にはトンネル入口での 20 km/h 弱から出口での 50～60 km/h まで加速するのに 2 km を要しており，前述の秦野サグの場合よりさらに緩慢な加速である．

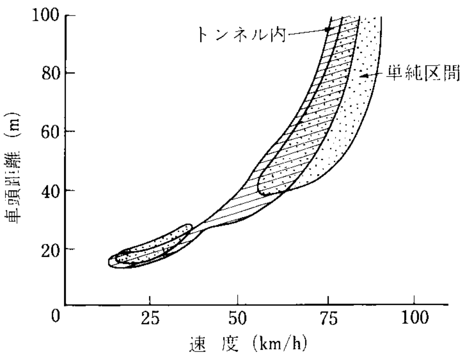
他のボトルネックについても断片的ながら速度プロファイルが得られているが，それぞれに特有の加速パターンがあるようである．

3.　現象の説明仮説

一体何ゆえに上述のような現象が起きるのであろうか．この問いに対して著者は証明された説明理論をまだ持ち合わせていない．現在あるのは仮説に過ぎず，今後これを証明するための研究が残されている．

（1）　なぜ大きな車群の後尾車が停止あるいは徐行に至るか

サグから上り勾配にかかったときにアクセルペダルをかなり大きく踏み込まなければ自由流での速度（60 km/h 以上程度）を保つことはできない．普通の運転者は速度の検出にはあまり敏感ではなく，少々速度が落ちてもすぐには気がつかず，アクセルをすぐに踏み込むことはしない．前車との間隔の検出は，速度の検出よりは感度もよく時間遅れも小さいので，前車の速度低下によって車間が詰まると，速度が落ちたにもかかわらず同じ車間を保とうとして自分も減速をする．この減速は，時間遅れのために前車の減速幅より大きくなる．これが



図―6　小仏トンネル内外の車頭距離-速度

減速波が次々に後続車に増幅されて伝搬することを説明する仮説である．

トンネルにおいては，明かり部から暗い閉鎖空間に突入して，つい無意識にアクセルペダルを踏む力を緩めてしまうために速度低下が生ずる．さらにそのうえ，トンネル内では明かり部に比べて速度と車間の関係が少し違う．図―6は小仏トンネルの内外で測定された速度-車頭距離の関係を示すものであるが，トンネル内の車頭距離がトンネル外よりやや長いことが認められる．このため，仮に前車が減速をしなくても，トンネル内で車間を伸ばすために後者は減速することになり，減速波が生じやすく，増幅も大きい．

（2）　渋滞時における車両の追従挙動のモデル

渋滞してしまった後では，サグあるいはトンネル入口を頭に低速の渋滞流ができ，この頭からあるフローレートで緩慢な加速流出が行われる，という状態で安定する．なぜそうなるのかという問いに答えるために，このような現象を起こすような渋滞時の車両の追従挙動仮説を次のように立てている．

渋滞流の中の任意の車両について，次の式で追従挙動が表わされるとする．

$$\dot{v}(t)=\frac{\alpha\dot{S}(t-T_1)}{S(t-T_1)^l}+\frac{\beta\{S(t-T_2)-f[v(t-T_2)]\}}{S(t-T_2)^m}-\gamma\sin\theta \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，v：速度

S：前車との間隔

T_1, T_2：時間遅れ

f：運転者の目標車間を表わす速度の関数

θ：サグ（クレスト）の縦断勾配差．上りに変化する場合を正．縦断曲線手前までの勾配を基準とし，縦断曲線部ではθは距離とともに連続的に変化する．

α, β, γ：定数

l, m：パラメーター

第1項は車間の伸縮速度または前車との相対速度に比例し，車間のl乗に逆比例する加速度成分である．第2項の$f(v)$は速度に応じた目標車間である．第2項の意味は，実車間と目標車間との差に比例し，実車間のm乗に逆比例するような加速度成分があるという仮説である．第3項は，道路の縦断勾配による走行抵抗の増分に比例する負の加速度成分である．この意味するところは，運転者は縦断勾配が変化してもそれを補償するだけの十分なアクセル操作を行わずしたがって勾配差によって加減速が生ずるという仮説である．

時間遅れT_1とT_2とに関しては$T_1 < T_2$の関係がある．すなわち速度差の検出はすばやいが，速度の検出あるいは車間と速度との関係の目標値からのずれの検出には，かなり大きな時間遅れがあると考えるからである．

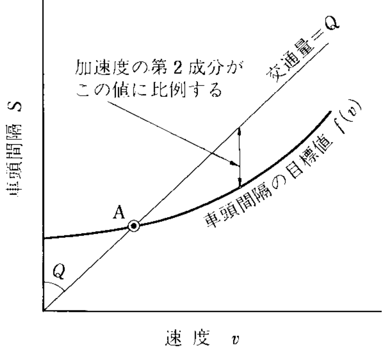
森[3]は$l=m=0$とした場合の追従シミュレーションを行って，パラメーターによっては実測される現象に近い現象を上式で再現できることを示している．

（3）　渋滞後の現象の説明

図―7は速度と車頭間隔との関係を示している．車頭間隔の目標値$f(v)$は右上がりの曲線であろう．交通量は速度と密度との積であり，密度は車頭間隔の逆数であるから，交通量$Q=v/S$となり，原点を通る直線が等交通量線となり，この直線の縦軸との勾配が交通量Qとなる．

渋滞後の安定状態においては，渋滞の頭まで図のA点の状態で流れてきて，そこから交通量Qの直線に沿って加速をしていく．したがって加速域にある下流の任意の地点での速度と車頭間隔との関係はこの直線のいずれかの点である．ここにQは，表―1および表―2に示した渋滞後の交通容量である．

上述の追従モデルによれば，渋滞の頭からの加速は直線Qと曲線$f(v)$との差に基本的に支配されるから，$f(v)$が与えられると渋滞の頭からの加速流出率とそこまでの渋滞流（A点）の流率とが等しくなるような直線の角度すなわち交通量Qが平衡状態として定まる．



図―7　速度，車頭間隔，交通量の関係

トンネル内のように $f(v)$ がさらに右上がりになれば(つまりより広い車間を要すれば)，直線もさらに右上がりとなり，Q は小さく，加速度も小さくなる．これが小仏トンネルでの加速が秦野サグに比べて緩慢な理由であろう．

渋滞の頭がサグあるいはトンネル入口にとどまって安定する理由は次のように説明できる．

まずサグについては加速度の第3成分，つまり勾配差に比例する成分のゆえである．もし加速波が外乱か何かの理由で前進して渋滞の頭がサグをこえて上り部にさしかかってしまうと，渋滞流（図―6のA点）がサグを通過することになり，勾配差のためにここで減速波が生じ，その下流には加速度が発生して，渋滞流の前進を阻む．反対に，もし加速波が後退してサグよりも上流から加速を始めてサグに至るようになると，再びサグによる減速が生じてその上流へ減速波を送り出す．このようにしてサグがちょうど加速開始点となって安定する．前述のようにこの渋滞の頭からの加速はきわめて緩慢であり，たとえば秦野サグでは22 km/hから57 km/hまでの35 km/hの加速に800 mを要したとすると，一様加速度と仮定すると，0.013 g の加速度となる．秦野サグの勾配差は2.3 % であり，もし運転者がこれを補償するアクセル操作をまったくしなければ0.023 g の減速度となるから，この勾配の影響は実際の加速状況に比べて十分に大きい．

次にトンネルについては，やはりトンネル入口が速度低下を起こさせる地点であるので，サグと同様の議論が成り立つ．

小仏トンネルで渋滞すると，路肩を走行する不届き者が出現し，これの取締りがトンネル上流（約3 km）で，相模湖サグよりも数百メートル下流にある相模湖バスストップで開始される．するとこの取締り地点が新たなボトルネックとなり，これを渋滞の頭としてここから加速を始める流れとなる．したがってトンネルそのものは自由流となってしまう．このときの交通量（新たなボトルネックの交通容量）は，取締り開始前よりわずかに低い．

取締りが終了すると，渋滞の頭は後退して相模湖サグに至り，ここでとどまって新しい安定状態となる．このときの交通量（サグの交通容量）はそれまでよりはるかに大きく，2 600台／時（2車線合計）程度である．

この現象も上述のサグやトンネルと同様に説明可能である．取締り地点は減速を起こさせる地点となり，したがって新たなボトルネックとなる．取締りが終わって加速流出率が高くなれば渋滞の頭は後退し，サグで停まって安定する．このときの容量はサグの容量である．この容量値はトンネルの渋滞後容量よりもかなり大きいが，このときにトンネルに到着している交通は自由流であり，渋滞前のトンネルの交通容量（約3 000台／時・2車線合計）よりも小さいので問題なくそのまま自由流で通過してしまう．

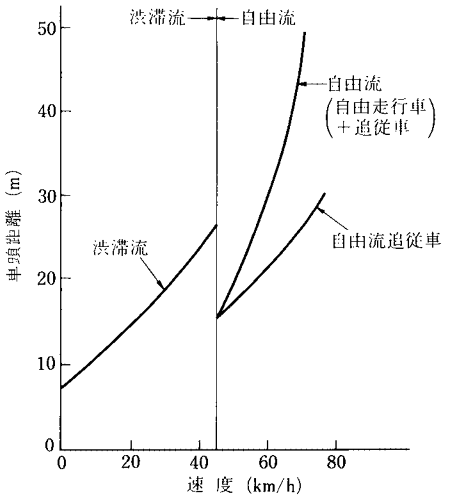
4. 対　　策

渋滞を起こさないようなトンネルやサグの道路構造はあり得るか．あるとすればどんな構造かについては今のところまったく答えも仮説もない．しかしこれからできるところも，すでに出来上がってボトルネックとなっている場所も含めて，交通運用上の対策はかなり自明である．まず（A）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である．次に，もし可能ならば，（B）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である．（A）の手段によって，2車線合計4 000台／時程度の交通需要までなら渋滞を生じさせないで済むであろう．しかし何かのはずみで交通需要がこの水準を超えると渋滞状態に陥ってしまい，その後は現状と同じ渋滞後容量となってしまう．しかし（B）の方法を併用できれば，常に約4 000台／時の水準を保つことができるであろう．

5. 今後の研究課題

（1） 渋滞発生から安定状態までの過渡現象

車群末尾車の停止や徐行が発生してから安定した渋滞状態に陥るまでの過渡現象については，実現象調査の追加も含めて，今後に残される部分が多い．この問題は結



図―8 自由流と渋滞流での速度と車頭距離との関係（概略図）[4)]

局は，自由流（臨界密度以下の流れ）における追従挙動と渋滞流での追従挙動との間に認められる不連続性（図—8）をどう説明するか，この不連続を運転者はどのように（どんな状況のもとでどの程度の時間をかけて）乗り移っているのかという問題に帰着するように思える．

図—8 は首都高速道路上で観測された速度と車頭距離の関係を模式的に示したもので，自由流と渋滞流との間に追従車頭距離に不連続なくい違いがあることが認められる．自由流では全車が追従状態ではないので，実際に観測されるのは図中の上の方の曲線であり，追従車の追従車頭距離と追従せずに自由に走行している車の前方の車間との混合である．追従車のみの車頭距離は図の自由流の下の方の曲線となるはずである．運転者達にしてみれば，特に速度 45 km/h 付近で追従挙動を切り換えているわけではないのであろうが，結果的にはこの臨界速度付近で追従車間の不連続な段差が現われる．

（2） 自由流における追従モデル

前出式（1）の追従モデルは，いわば前車に「引かれて」走る，負圧の流れを表わしている．それにひきかえ，自由流は，できるだけ各自の希望速度で走りたいとする流れで，交通量が増え，速度が低下するにつれて，前車に邪魔されてそれ以上先に行けないから仕方なく前車の後に追従して走るという，いわば前車に「抑えられながら」走る正圧の流れであるととらえることができる．

現在のところ著者が想像している自由流追従挙動モデルは，式（1）の右辺の 3 項に加えて，第 4 項目として，希望速度と実速度との差に比例するような加速度成分を取り入れたものである．また，第 1，第 2 項は，実速度が希望速度より小さいときにのみ有効である．このようにすることによって，**図—8** にみられる自由流と渋滞流との間の車頭間隔の不連続を説明することができる．

このようなモデルを考えると，自由流から渋滞流にあるいはその反対に移るときに個々の運転者がこの第 4 項目の加速度成分をどのように捨て，あるいは獲得するかを実測によって確かめなければならない．どんな方法でこれを実測するかを含めて，今後の興味ある課題と考えている．

6. おわりに

ここに述べた成果は，著者の研究室における長期的，継続的な研究活動の蓄積に負っている．当研究室に在籍しあるいは外部にあって協力してこの研究に参画，貢献して下さった多くの方々があり，ここにそのすべてを列挙し切れない．厚く謝意を表する．

また，昭和 58 年度文部省科学研究費一般 C「高速道路ボトルネックの交通容量に関する研究」による成果もこの報告の重要な一部を成しているので付言して謝意を表する．

参 考 文 献

1） 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，昭和 59 年 3 月．
2） Edie, L. C. and Foot, R. S.：Effect of Shock Waves on Tunnel Traffic Flow, HRB Proceedings, No. 39, pp. 492～505, 1960.
3） 森　浩：都市間高速道路における追従特性と交通容量の研究，東京大学博士課程学位論文，昭和 61 年 2 月．
4） Koshi, M., Iwasaki, M. and Ohkura, I.：Some Findings and an Overview on Vehicular Flow Characteristics, Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, June 24～26, 1981, Toronto Canada, pp. 403～426.

（1986. 6. 9・受付）