

# 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

邢 健<sup>1</sup>・越 正毅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 工博 東関東道路エンジニア(株) 調査設計第一部 (〒116 東京都荒川区東日暮里5-7-18)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

高速道路のトンネルやサグでの渋滞現象はこれまでの交通流理論では十分に扱われていない。本論文では、サグでの渋滞現象を対象に交通流実態調査を行い、ボトルネックでの減速波の発生・増幅伝播現象を車両の追従挙動から説明し観測データを用いて検証した。また、車両追従モデルのパラメータを推定し追従シミュレーションを行った結果、この追従モデルが実交通流現象をかなり再現できることが分かった。

**Key Words:** *congestion, bottleneck, car-following behaviour, sag, shock wave, car-following model, simulation, S-V relationship, parameter estimation*

## 1. はじめに

事故あるいは故障車などの外的な支障がないにもかかわらず、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）をボトルネックとするいわゆる自然渋滞が発生している。これらのボトルネックの交通容量は、片側2車線合計で渋滞発生直前では3,000台/時程度、渋滞時では2,200～2,700台/時程度にまで低下し、これまで言われてきた単路部区間の可能交通容量4,000台/時の約6割になってしまふ<sup>1)～4)</sup>。このようなボトルネック現象は、各々の運転者のごく普通の追従運転挙動の集積として交通流の内部で形成されるものである。従って、車両の追従挙動を基礎として解析することにより、ボトルネック現象の発生、安定などの動的メカニズムを明かにし、また、車両追従モデルによるシミュレーションを行い、実交通流現象を再現することが本研究の目的である。

## 2. 在来の研究と本研究の位置付け

高速道路の単路部におけるボトルネック現象については、これまで主に日本で研究が行われてきたが、外国で取り扱われる論文はあまり見当たらない。特に、渋滞発生時の自由流から渋滞流へ遷移する時のダイナミックな過渡現象に関する研究は少ない。

越<sup>1)</sup>は、1984年に初めて、高速道路のトンネルにおける渋滞現象を考察し、トンネルが単路部の容量

上のボトルネックとなり得ること、さらに渋滞中の交通容量は渋滞前より低くなることを指摘している。また、1986年に越<sup>2)</sup>は、サグにおいてもトンネルと同様な渋滞現象が生じ、そして東名及び中央高速道路の主なサグやトンネルでの渋滞中の交通容量を調べ、渋滞前よりかなり低いことを述べ、さらにこの様なボトルネック現象を運転者の追従挙動に着目し、渋滞流と自由流の車両の追従モデルを提案している。越ら<sup>3), 4)</sup>は、この様な容量の低下は渋滞に巻き込まれる時間によって影響し、また渋滞中の容量は明るさによっても影響されることを報告している。

邢<sup>5)</sup>は、越の提案する追従モデルに対し、高速道路での追従実験から得られた走行データを基に、自由流と渋滞流の双方の追従パラメータの推定を行っている。また、大口<sup>6)</sup>は、車両の追従挙動をファジィ推論を用いてモデル化を試みている。しかし、追従実験より求められたパラメータは、実験という状況の下で追従を意識して走行している状態であり、通常の一般の運転者の走行挙動とかなり異なる可能性があり、またある一人のドライバーの運転挙動のために、これらの追従モデルを用いてシミュレーションによる実交通流現象への再現は難しい。

そのため、邢ら<sup>7)</sup>は、1990年に東名高速道路上り線の秦野付近のサグで気球による空中撮影を行い、画像処理によって得られた車両の走行軌跡を用いて解析し、渋滞流中のボトルネック付近で断続的な減速波が発生していることが分かり、さらに渋滞流中

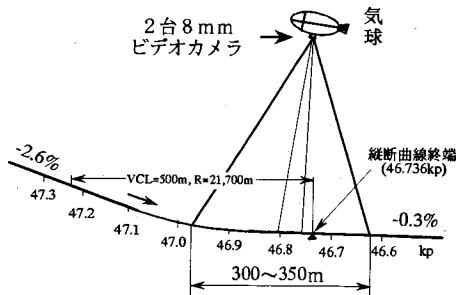


図-1 気球による空中観測（秦野サグ）

の車両の追従挙動を分析している。しかし、渋滞発生のきっかけ現象は観測できなかったため、分析していない。

本論文では、その翌年新たに観測したデータを加え、サグでのボトルネック現象及び車両の追従挙動を対象に、以下のことを分析している。

- ① 渋滞発生時の減速波の発生・伝播現象
- ② 渋滞中の渋滞列の先頭位置
- ③ ボトルネック付近における車両の追従運動挙動と追従モデルのパラメータの推定
- ④ 追従シミュレーションによる実交通流現象の再現

### 3. 交通流実態調査

サグにおけるボトルネック現象及び車両追従挙動の解明には、各々の車両の運動を時間軸及び距離軸に広がりを持ちかつ連続的に捉える必要があるため、これまで有効な観測手段がなかった。本研究では、観測気球に搭載した2台の8mmビデオカメラによる空中撮影を行い、ビデオ画像を用いて各車両の走行軌跡を収集している。図-1に気球による空中観測の概略を示す。ボトルネックとなるサグの観測地点は、自然渋滞の発生する確率が高く、前後や当該区間で平面線形の影響が少ない東名高速道路上り線の秦野付近の46.7kpのサグ（秦野サグ）とした。当該秦野サグの上り線方向の上流側の縦断勾配は-2.6%，縦断曲線（R=21,700m）を500m挟んで下流側は-0.3%の勾配になっている。

観測は2回行われた。1回目の空中観測は1990.7.29（日）に行ったが、秦野サグで渋滞する直前に約1kmの上流で交通事故が起きたために、ボトルネ

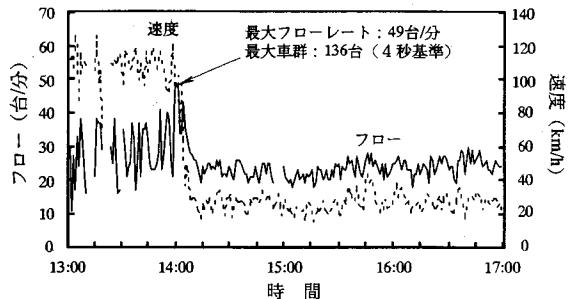


図-2 追越車線1分間平均速度とフロー(47.5kp, 1991)

ック付近での渋滞流の先頭位置については捉えられたものの、自由流から渋滞流へ遷移するときの減速波の発生・伝播現象については観測できなかった。そこで、1991.7.28（日）に再度同じ地点で同様な交通流観測を行い、渋滞発生直前の減速波の発生及び伝播等の現象を観測できた。ここでは、観測されたデータを用いて渋滞発生直前の減速波の発生・伝播現象、渋滞の先頭位置及び車両追従挙動などの解析を行った。なお、ビデオ画像の処理方法は前回の報告<sup>7)</sup>と同じであるので、ここでは省略する。

### 4. ボトルネック現象

本項では、渋滞発生直前の減速波の発生・伝播のメカニズムについての仮説及び検証、渋滞先頭位置の分析を行う。

#### (1) 減速波の発生

図-2は、1991年観測されたサグの約800m上流の47.5kp地点（縦断曲線の始点より250m上流）の追越車線における1分間平均速度とフローを示すものである。この図から、秦野サグにおいて14:00頃に急激な速度低下が見られる。この時の1分間最大フローレートは49台/分（約3,000台/時）であり、その後上流からの需要が十分あるため、速度が回復しないまま渋滞となったことが見られる。このサグの下流46.6kp地点での観測によると、下流での速度は徐々に回復している。これらのことから、秦野サグはボトルネックとなっていることが分かる。また、上流の47.5kp地点での観測によると、渋滞発生直前に136台の大きな車群がサグの上流に到着していることが分かる。このため、この大きな車群が当該サ

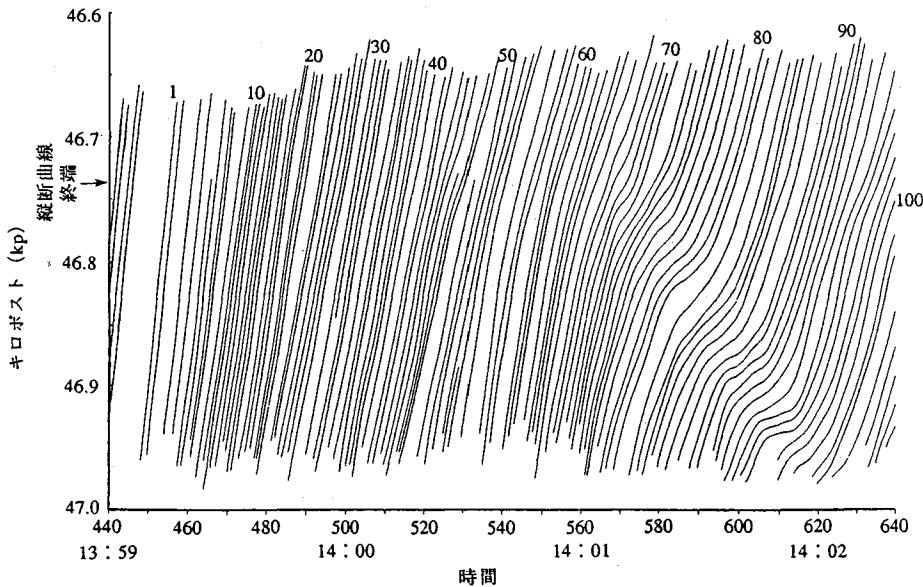


図-3 淀滞直前におけるTime-Space図（秦野サグ追越車線, 1991）

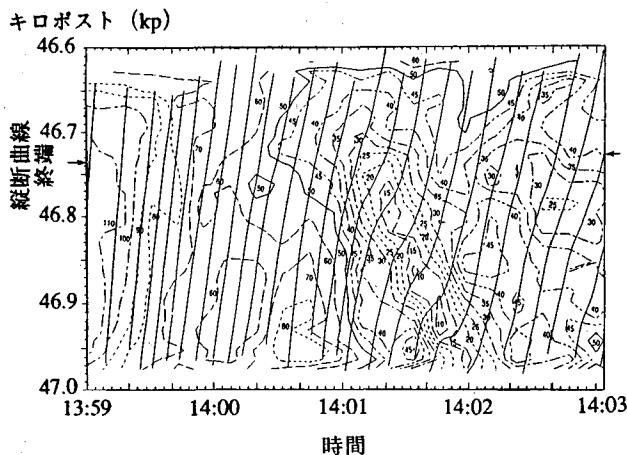


図-4 淀滞発生直前における速度コンター図  
（秦野サグ追越車線, 1991）

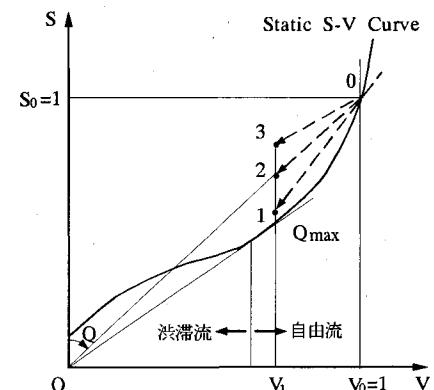


図-5 S-V平面上の減速波の発生・伝播の説明

ゲに到着し減速波を起こし、渋滞のきっかけとなつたものである。

図-3は1991年の空中観測から得られたこの車群の各車両の走行軌跡を表すTime-Space図であり、サグに到着、通過する状況を表したものである。この図から大きな車群が縦断曲線の終端付近で減速挙動により減速波を起こし、車群の後方ほどに増幅されて上流へ伝播することが分かる。なお、この自由流から渋滞流へ遷移するようなダイナミックな現象を分析するには、時間的、空間的な変動を表すコンタ

一図が非常に便利である。図-4は図-3の各車両における0.5秒ごとの速度から作成した速度コンター図（等速度線）であり、時間-空間上で交通流の速度変動を表している。また、速度コンターと同時に5台毎の車両の走行軌跡もプロットしている。

この図によると、13時59分に上流から大きな車群が秦野サグに到着し、この車群の先頭車両が100～110km/hの速度でサグを通過している。その後の車両の速度は徐々に低下し、その1分後、車群の先頭から45台目当りの車両が縦断曲線の終端付近で大き

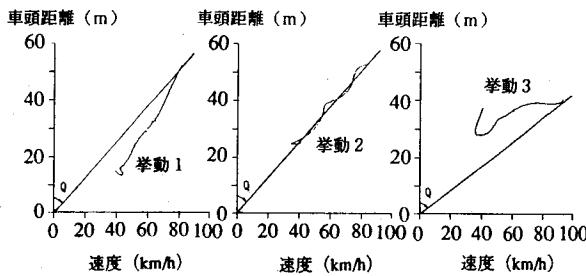


図-6 S-V平面上の車両の減速挙動の例

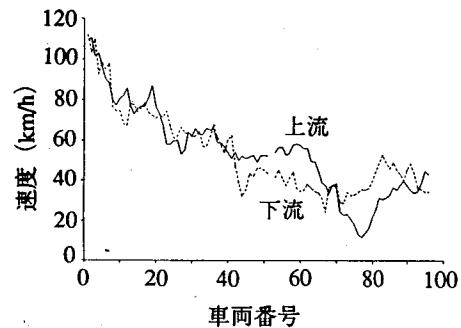


図-7 秦野サグ付近上下流2地点の速度  
(追越車線46.80 & 46.72kp, 1991)

な減速を起こし、この影響を受け車群の後方車両も時間と共に増幅減速し、減速波を起こしている。14時1分頃には約70台目あたりの車両からその減速波（図中の低速波）が上流へ増幅伝播し始め、95～97番目の車両はほぼ停止を強いられている。この減速波が通過した後、各車両の速度は徐々に回復しているが、回復後の速度はこのサグ区間では高々40～50km/h程度である。また、この車群の到着、減速波の発生・増幅伝播のような一連の現象は約3分間に起きている。この大きな減速波の後、上流からの需要が大きいため、速度が回復せず渋滞となった。

このようなボトルネックでの短時間内のダイナミックな現象については、現存の巨視的交通流モデルでは説明しきれないため、各車両の追従挙動のような微視的特性から追究しなければならない。

## (2) 減速波発生の仮説と検証

減速波の発生・伝播の原因は巨視的にみると、上流のフローレートが下流より大きいことによるものである。つまり、上流からの高いフローレートの交通流がサグの手前に到着し、そのままの状態でサグを通過することができず、図-3のように縦断曲線の終端付近で見られるようにやや低くなっているフローレートに抑えられ、その上下流のフローレートの差が減速波を起こし、上流へ増幅伝播したものと考えられる。

減速波の発生のメカニズムは微視的にも仮説として説明できる。

サグを通過する時に、勾配の変化や加速不足等の原因で速度低下が起こり得る。普通の運転者は速度に対してはあまり敏感ではなく、それよりも前方車との車間あるいは相対速度に対しての感度がよく反応遅れも小さい。前方車の速度低下によって車間が詰まると、サグによる自車の速度の低下には気づか

ず、なるべく車間を保とうとして減速する。この減速の度合は時間遅れによって前車より次第に大きくなり、車群の後方の車両ほど大きくなる。大きな車群の場合では、後方の車両は徐行もしくは停止を強いられるようになる。このように減速波が発生し上流へ増幅伝播するものと考えられる。

巨視的にも微視的にも共通な点は減速挙動によりフローレートが低下することである。即ち、車両は車間を保とうとしてフローレートの低下する状態へ減速し、車群によって累積され、その結果サグの縦断曲線の終端付近で低くなったフローレートに抑えられるため、減速波を起こし上流へ伝播するものである。

この減速波の発生・伝播現象は図-5に示す速度(V) - 車頭距離(S)平面上で説明できる。この図は定的なS-V関係と共に減速挙動を示しているものである。S-V図では、原点と結ぶ直線と車頭距離の軸との角度は等価フローレート(1/車頭時間)を表している。図中のS-V関係は、運転者の平均的な追従挙動であり、自由流では下凸形、渋滞流では上凸形という関係になっている。もしドライバーの運転挙動がこの定的なS-V曲線上に乗っていれば、従来の認識のとおり、自由流では速度低下と共にフローレートが上がり、渋滞流では逆に下がる。しかし、ドライバーの実際の運転挙動は、ダイナミックなために、必ずしもこのS-V上で動いているのではなく、そのまわりで動いている。また、速度の錯覚などの原因でS-Vから外れることが多い。従って、自由流では必ずしも従来の理論通りに速度低下に伴ってフローレートが上がるということではなく、時には逆に下がることもありうる。例えば、図示のように減速する時に、車間を保とうとして、原点との直線の上に減速すると、フローレートが下がることがわかる。

ここで、速度 $V_0$ から速度 $V_1$ への減速挙動を考えてみよう。図には三つの典型的な減速挙動1, 2, 3が見られる。この図では減速中の状態の変化を省略し、減速前と減速後の二つの状態だけを示している。減速挙動1は減速前よりフローレートの高い状態へ、挙動2は減速前と同じフローレートの状態へ、挙動3は減速前より低いフローレートの状態へとそれぞれ減速している。この中で、挙動1と2は減速波を起こしても減速後のフローレートが低くならず、ボトルネック現象とはならない。しかし、挙動3は、減速前よりフローレートが低くなっている。このような減速挙動によるフローレートの低下は車群によって累積され、減速波の発生や增幅伝播を起こすきっかけとなっているものと考えられる。

図-6は、図-3に示す渋滞直前の密な車群の中に前車との車頭間隔と走行速度との状態を示す減速挙動の例である。車群先頭から35~70番目の車両に着目してみると、36台の内減速挙動1, 2, 3を示す車両台数がそれぞれ4(11%), 5(14%)と27(75%)となっている。従って、上述のような減速挙動1と2は少なく、主に初期車間が開いている時に起きる。減速挙動3は様々な初期状態において起こり、このような減速をする車両の多いことがわかる。また、サグの上下流2地点における各々の車両の車頭時間からも確認されており、減速波発生までの殆どの車両は上流から下流にかけて車頭時間が増加している。多数の車両について減速後のフローレートが減速前より低下していることから、減速波発生の仮説の検証となりうるであろう。

図-7は、サグ区間の縦断曲線の終端付近上下流の80m離れた2地点(46.80kpと46.72kp)での各車両の速度を示したものである。この図から、車群先頭から約40番目までの車両は、順次に速度が低下しているが、この上下流2地点間の速度にはあまり差がない。しかし、その後ろの40~70番目車両の速度は、上流では50~60km/hのレベルであるが、下流では大きな減速をしている。その減速の幅も車群の後方ほど大きくなっている。いわゆる增幅をしていることになる。約70番目からの車両は上流へ伝播していく減速波から加速しているため、下流の速度が逆に上流より高くなっている。

以上のことから、減速後のフローレートが減速前より低下し、それによって下流のフローレートが上流より低いことがわかり、これは減速波の発生や增幅伝播のきっかけとなっているものと考えられる。

### (3) 渋滞の先頭位置<sup>4), 7)</sup>

越<sup>2)</sup>は、渋滞の先頭はサグに留まって安定するこ

キロポスト(kp)

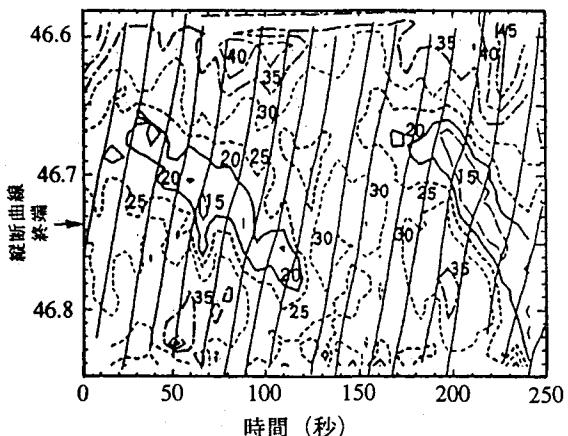


図-8 渋滞時のボトルネック付近の速度センター図  
(秦野サグ追越車線, 1990)<sup>7)</sup>

とを指摘している。それは長い区間に着目して見た場合、サグ付近に留まることであるが、詳細に見ると、その先頭が実際にサグのどこかに留まっているか、それともある区間内を移動しているかについては、非常に興味深い問題であり、本調査の目的の一つでもある。

図-8は、1990年の空中観測による渋滞時の速度センター及び5台おきの走行軌跡を示すものである。この図から、渋滞時でもボトルネック付近において減速波が起きて、上流へ伝播していることがわかる。減速波の発生地点はほぼ一定であり、縦断曲線終端から下流約100mの区間にある。250秒内に二つの減速波が発生し、上流へ伝播しており、その最初の減速波は縦断曲線終端の上流数十mの所で解消しているが、約180秒後に発生している2番目の減速波は観測区間内で解消することなく上流へ伝播している。また、他の時間帯のデータからも同じ様な現象が発生していることが観測された。そして、図-8の下流約300m区間を解析した結果、サグからの発進交通流になっており、車両の速度が徐々に回復し、減速波も観測されなかった。これらのことから、サグでの渋滞先頭はどこかある一地点に留まっているのではなく、サグの縦断曲線終端付近の区間に移動するものであることがわかる。

この現象は次のように説明できる。サグの少し下流で起きた減速波が上流へ伝播し渋滞の先頭が上流側へ移動する。この先頭位置から加速して車両が下流に行くほど速度が高くなり、サグの下流側の低速流に追いつくことによって減速挙動を起こし、再び減速波が発生し先頭位置もサグの下流側に移動する。

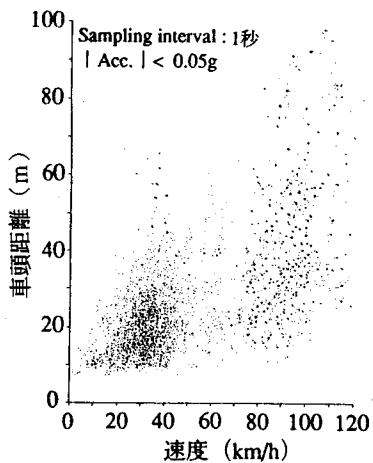


図-9 実交通流の速度と車頭距離の関係  
(秦野サグ追越車線, 1991)

このようにサグ付近で周期的な減速波の発生・伝播の現象が生じ、渋滞の先頭がある区間内を前後に移動するものと考えられる。

このような断続的な減速波の発生・伝播はボトルネックがサグに留まる原因でもある。また、ここでの断続的な減速波の発生・伝播現象と違って、サグで停止している減速波も理論上では、ボトルネックがサグに留まる一つの原因でありうるが、実際にはまだ観測されていない。

## 5. 車両の追従挙動

本項では、空中観測から得られた実交通流データを対象に、速度と車頭距離との関係を分析し、追従モデルのパラメータを各々の車両に対して推定する。更に求められたパラメータを用いて追従シミュレーションを行い、追従モデルの検証を行う。

### (1) 車両追従モデル

越<sup>2)</sup>はより現実的な追従挙動をモデル化し、高速道路単路部のサグやトンネルなどを先頭とするボトルネック現象（交通容量の低下や渋滞先頭の位置など）の再現を目指して、次のような追従モデルを提案している。

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

ここで、  $V_f$ : 追従車の速度,

$S$ : 前車との車頭距離,

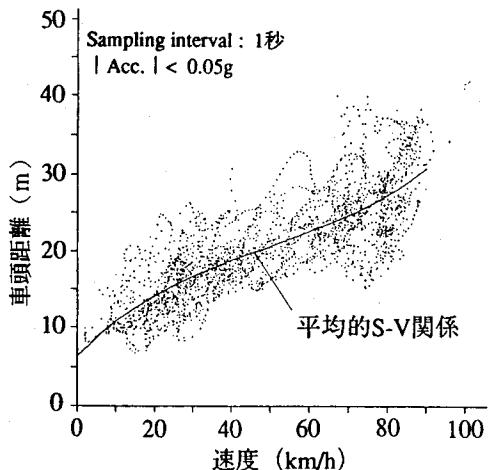


図-10 追従実験による速度と車頭距離の関係  
(中央高速道路)

$T_1, T_2$ : 反応遅れ（タイムラグ），  
 $\theta$ : 縦断勾配，  
 $f$ : 運転者の希望車間を表す速度の関数，  
 $\alpha, \beta, \gamma, l, m, n$ : モデルパラメータ。

この追従モデルの前3項は、渋滞流に対するものであり、それぞれ前車との相対速度、実車間と希望車間との差、と道路の縦断勾配による走行抵抗の増分に比例する加速度成分である。又、自由流の車両追従挙動に関しては、越<sup>2)</sup>が全3項の他にさらに第4項として、ドライバーの希望速度と実速度との差に比例する様な加速度成分を付け加えたものと指摘している。

### (2) 速度と車頭距離の関係

図-9は、1991年の空中観測により得られた秦野サグ付近の追越車線の渋滞発生前後の約20分間の各車両の定常走行状態（加減速度が0.05g以下）における速度と車頭距離の関係（S-V）を1秒間隔にプロットしたものである。この図より、全速度領域において、速度に対する車頭距離はかなりばらついており、そのばらつきは、渋滞流より自由流の方が大きい。また、ここでは図示しないが、追越車線の車間より走行車線の車間の方が大きく、ばらつきもさらに大きいことが確認された。これは、実交通流ではドライバーによって車間がかなり異なることを意味しており、各々のドライバーの追従運転挙動と言えよう。

なお比較のため、図-10には中央高速道路において2台の試験車による追従実験から得られた一人の

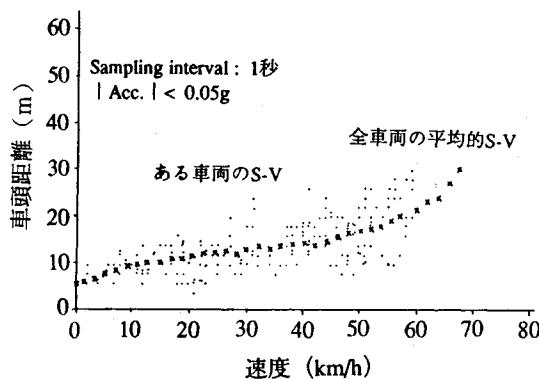


図-11 追従実験による速度と車頭距離の関係  
(筑波土研テストコース, 越ら<sup>9)</sup>)

ドライバーの速度と車頭距離の関係及び3次曲線で回帰した平均的なS-V関係を示している<sup>5)</sup>. また、図-11には建設省土木研究所のテストコースにおいて、29台の車両を用いて追従走行させて観測したあるドライバーの速度と車頭距離の関係と全車両の平均的なS-V関係を示している<sup>9)</sup>. これらの図より、いずれの追従実験においても平均的なS-V関係は渋滞流領域では上凸、自由流領域では下凸というような関係が見られる. また、実交通流では様々な運転挙動を持つドライバーが混在しているため、観測された車間は追従実験の車間より大きく取っており、またばらつきが大きいことが伺える. これは、実交通流中ではドライバーが2つの追従実験の様に追従を意識して運転をしていないからであると思われる.

### (3) 車両追従モデルのパラメータの推定

#### a) パラメータ推定の定式化

追従モデル(1)はパラメータ  $I, m$  がゼロでなければ非線形性となり、また  $I, m$  は他のパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  ほど重要ではないため<sup>5)</sup>、本論文では簡略的に  $I = m = 0$ とした. また、空中観測から得られた自由流中の各車両のデータが少ないため、自由流に関する追従モデルの推定は省略した. しかし、この場合のパラメータの推定手順は渋滞流のそれと同じである.

パラメータ推定のための追従モデルは式(2)である.

$$V_f(t) = \alpha S(t-T_1) + \beta \{S(t-T_2)-q[V_f(t-T_2)]\} - \gamma \sin \theta \quad (2)$$

式(2)では、希望車間を表す速度の関数は自由流と渋滞流を同時に表す3次曲線に近似すると仮定す

る.

$$f(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 \quad (3)$$

ここに、  $a_0, a_1, a_2, a_3$  は  $f(V)$  のパラメータである.

ここで推定すべきパラメータ  $\phi$  は合わせて9個ある.

$$\phi = (T_1, T_2, \alpha, \beta, \gamma, a_0, a_1, a_2, a_3)^T$$

本研究では、追従モデルのパラメータの推定は出力誤差の最小化によって定式化できる.

$$\text{Min } I(\phi)$$

$$\text{s.t. } \phi \in \Omega \quad (4)$$

ここに、  $I(\phi)$  : 出力誤差を表すパラメータの関数、

$\Omega$  : パラメータ空間.

$I(\phi)$  には出力として加速度、速度及び車間三つの変数が考えられるが、ここでは簡単にするために、車間だけに関する指標を取り入れた. これは、車間が加速度によって積分され、誤差が最も大きくなるからである. なお、出力誤差  $I(\phi)$  は車間の推定誤差の平方和で定義することにした.

従って、パラメータ推定の定式化(4)は次のように表せる<sup>8)</sup>.

$$\text{Min } I(\phi)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} T_1 > 0 \\ T_2 > 0 \\ \alpha \geq 0 \\ \beta \geq 0 \\ 0 \leq \gamma \leq 10 \end{cases} \quad (5)$$

前述の秦野サグにおいて観測された各車両ごとのパラメータを以下の方法で推定した.

#### b) 推定方法

推定の定式化(5)は非線形最適化問題に帰化されたので、通常の最適化アルゴリズムを適用すればよい. 最適化探索法には微分を用いる方法と用いない方法があるが、ここでの目標変数  $I(\phi)$  には、あるパラメータ  $\phi$  を利用しシミュレーションから得られた車間を用いて推定誤差を算出するため、微分ができないという制約のあることを考慮して、コンプレックス法<sup>10)</sup> (Box, 1965) を用いることにした. この方法は、シンプレックス法を不等式制約付き最小化問題に拡張し、シンプレックス法のアルゴリズムと制約条件を満たす手順によって構成される試行探索法である. 最適化問題(5)のパラメータ  $\phi$  の

表-1 車両追従パラメータの例

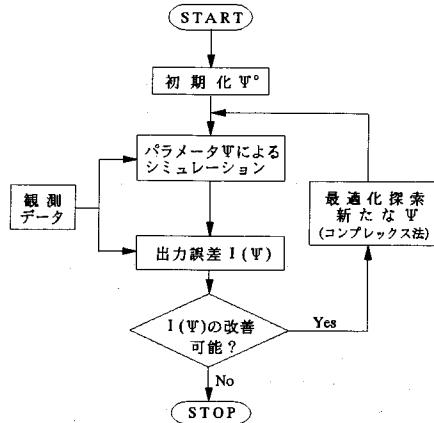


図-12 最適パラメータの探手順

探査手順を図-12に示す。

なお、出力誤差算出のために各車両ごとに次のような追従シミュレーションを行った。

- 1). 先行車の軌跡（速度と位置）を観測値の通りに与える。
- 2). 追従車の初期時間  $T_0 = \max(T_1, T_2)$  内の速度と位置を観測値の通りに与える。
- 3). 追従車の加速度は追従モデル（2）により算出し、またその積分によって速度と位置を計算する。
- 4). 最大加速度は  $3.0 \text{m/s}^2$ 、最小加速度は  $-4.5 \text{m/s}^2$  とする。

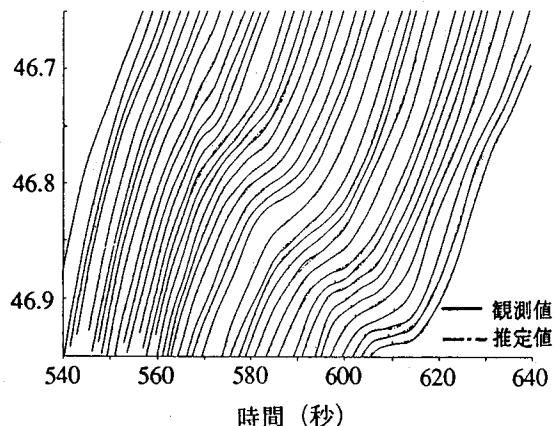
この追従シミュレーションでは、先行車の軌跡を観測値の通りに与えるのでシミュレーションの精度に影響されないため、本論文では誤差累積なしの追従シミュレーションと名付けている。またこれに対し、先行車の軌跡として観測値の代わりにシミュレーション結果を与える場合を、誤差累積の追従シミュレーションと呼んでいる。コンプレックス法で得られるパラメータ  $\psi^*$  は必ずしも最適であるとは限らず、もし出力誤差  $I(\psi^*)$  が大きければ、初期パラメータを変えて再度図-12 の手順を実行し、よりよいパラメータを求める。

### c) 推定結果

パラメータ推定に用いたサンプルは図-2の中の車両No. 57～96の39台の車両であり、これらの車両は渋滞発生直前の減速波の発生・伝播する状態にある。上述の探査手順を各々の車両に対して適用し、それぞれの追従パラメータを推定した。表-1は例として39台の内1台おきの車両の追従パラメータと出力誤差  $I(\psi^*)$  を示すものである。推定されたパラメー

No.	$I(\psi)$	$T_1$ (1S)	$T_2$ (1S)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
58	0.52	1	36	0.626	0.105	0.290	9.641	0.582	-2.08E-03	2.00E-07
60	0.23	1	41	1.022	0.065	2.365	4.966	0.482	-2.66E-03	3.80E-06
62	0.12	1	49	0.914	0.051	1.527	2.844	0.329	-1.31E-03	2.20E-05
64	0.34	6	40	0.513	0.043	2.343	4.162	0.493	-4.51E-03	3.90E-05
66	1.26	1	29	0.390	0.039	2.129	7.021	0.862	-4.82E-03	4.49E-05
68	0.51	4	30	4.586	0.052	1.614	9.729	2.435	-6.59E-02	2.23E-04
70	0.60	1	31	1.496	0.206	0.000	14.195	0.218	-6.77E-03	7.62E-05
72	0.71	1	15	0.602	0.026	0.003	-0.680	0.407	1.22E-02	-3.41E-05
74	1.48	1	23	0.912	0.048	2.542	5.548	0.625	-1.13E-02	2.49E-05
76	0.64	3	38	0.640	0.053	4.458	7.566	0.707	-5.57E-03	3.79E-05
78	0.91	11	42	0.466	0.010	5.291	8.070	0.844	-5.65E-03	3.70E-05
80	0.54	7	37	0.861	0.164	3.074	5.373	0.525	-5.90E-03	6.30E-06
82	0.78	1	20	0.499	0.041	0.329	10.768	1.537	-3.09E-02	5.39E-05
84	0.43	1	70	0.924	0.106	0.777	-2.528	0.723	-4.11E-03	2.59E-05
86	0.68	1	6	0.328	0.096	3.451	9.018	0.660	-8.91E-03	6.28E-05
88	0.81	1	61	0.374	0.111	0.135	1.397	0.395	-3.80E-05	4.95E-05
90	1.08	1	41	1.093	0.090	1.641	4.816	0.596	-5.85E-03	3.53E-05
92	1.43	21	41	0.339	0.054	9.825	0.364	0.743	-4.11E-03	-5.20E-06
94	0.79	5	22	0.263	0.112	9.663	7.172	0.988	-1.15E-02	4.29E-05
96	0.88	2	39	0.592	0.071	1.672	5.412	0.489	-3.43E-03	2.81E-05

キロポスト (kp)

図-13 車両走行軌跡の観測値と推定値の比較  
(渋滞発生時、誤差累積なしシミュレーション)

タは各車ごとに多少異なるが、以前著者ら<sup>5)</sup>が追従実験のデータから推定した追従パラメータに概ね一致しており、また、推定された速度と車間距離の関係も全体的にこれまでの観測結果とほぼ合致している。

また、図-13は、各車両ごとに推定されたパラメータを用い、誤差累積なしの追従シミュレーションを行って得られた各車両の走行軌跡の推定値と観測値との比較を示したものである。この図から、誤差累積なしのシミュレーションから得られた走行軌跡は、観測値にかなり一致していることがわかる。これは追従パラメータを精度よく推定することにより、上記の追従モデルが実交通流を再現できることを意

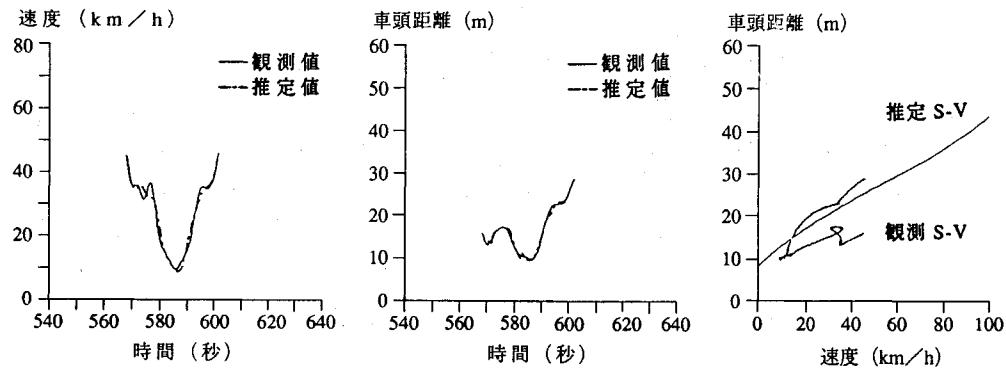


図-14 ある車両の速度、車頭距離及びS-V関係の観測値と推定値の比較  
(誤差累積なし追従シミュレーション)

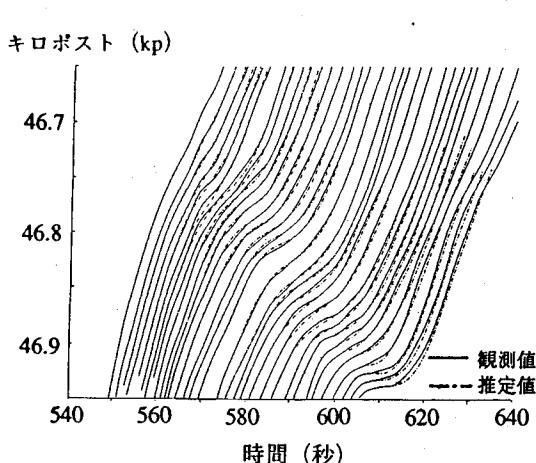


図-15 車両走行軌跡の観測値と推定値の比較  
(渋滞発生時、誤差累積シミュレーション)

味している。このことは図-14に示すようある車両の速度と車頭間隔の比較からもわかる。また、この図には観測された動的なS-V関係と、推定された定的なS-V関係も示している。この図から分かるように、推定された定的なS-V関係は、ドライバーの平均的なものであり、実交通流の動的S-V関係はS-V平面上で定的なS-V関係のまわりをループを描くようにヒステリシスを持った動きをしている。このような動きは追従実験からも確認されている。なお、推定されたS-V関係も予想通り渋滞流では上凸、自由流では下凸の様な合理的な形になっている<sup>5)</sup>。

#### d) シミュレーションによる追従モデルの検証

車両追従モデルを検証するために、推定されたパ

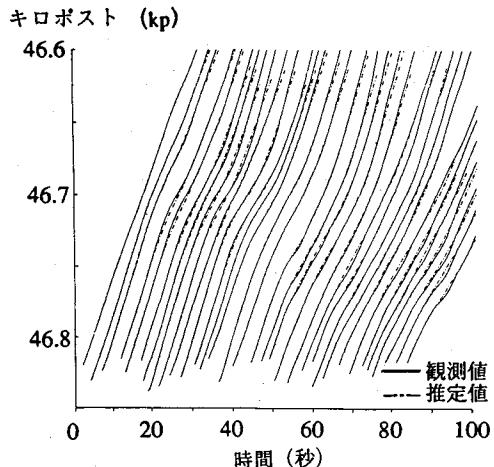


図-16 車両走行軌跡の観測値と推定値の比較  
(渋滞時、誤差累積シミュレーション)

ラメータを用いて、誤差累積の追従シミュレーションを行った。ここでは各車両ごとに先行車の速度及び位置として観測値を与えるのではなく、シミュレーション結果をそのまま与えている。即ち、車群の先頭車の軌跡と各後続車の初期速度と位置のみを与えて、その他はすべて追従モデルによって算出する。

図-15は上述のサンプルを用いて誤差累積の追従シミュレーションによる各車両の走行軌跡の推定値と観測値の比較を示している。この図から、誤差累積シミュレーションで得られた走行軌跡は、図-13のような車両毎の誤差累積なしのシミュレーションの結果より推定精度が下がるもの、全体的には実交通流中の渋滞発生直前の減速波の発生・伝播現象を再現していると言えよう。また、図-16は渋滞流

中のサンプルにおけるシミュレーションの結果を示すものである。渋滞流中の減速波のような実現象も精度よく再現していることがわかる。

ただし、ここで推定された追従モデルのパラメータは、それぞれの状況の下で推定されているため実交通流現象を再現できたが、他の状況では追従挙動が異なる可能性があり、このまままで追従シミュレーションによる実現象の再現は難しいと思われる。その理由としては、

- \* この追従モデルが必ずしもすべての状況に対応していないこと、
- \* 同じドライバーでも、パラメータが状況によって変わること

等の点が挙げられる。従って、上述の様なモデル構造や各々の状況でのパラメータの推定などの点を今後さらに深く追求していかなければならない。

## 6. まとめ

本研究では、高速道路のボトルネック現象及び車両追従挙動を解明するために、交通流実態調査を行い、自由流から渋滞流へ遷移するときの減速波発生・増幅伝播現象についての仮説の提案及び検証を行った。また、車両追従挙動として速度と車頭距離との関係の分析、追従モデルのパラメータ推定及び追従シミュレーションを行った。

その結果、

- ① 大きな車群がサグにさしかかると、サグの縦断曲線の終端付近で減速波が発生し、そして增幅しながら上流へ伝播する。
- ② 減速後のフローレートが減速前より低下し、それによって下流のフローレートが上流より低いことが、減速波の発生や増幅伝播のきっかけとなっているものと考えられる。
- ③ 渋滞時にサグの縦断曲線終端付近で約3分の間隔で減速波が発生し、上流へ伝播したり途中で解消したりする。渋滞の先頭位置は、縦断曲線終端付近のある区間に前後に移動している。
- ④ 追従モデルのパラメータ推定は車間の出力誤差の最小化として定式化し、コンプレックス法を用いて各車両ごとに行った。また、推定されたパラメータを利用して追従シミュレーションを行った結果、追従モデルは実交通流現象をかなり近似的に再現できることがわかった。

謝 辞： 本研究を進めるにあたり、日本道路公团試験研究所、東京第一管理局、横浜管理事務所、松田工事事務所の各方面の方々及び㈱オリエンタルコンサルタンツの皆様には深甚なご協力を頂きました。また、横浜国立大学の大蔵教授、首都高速道路公団の森田次長、千葉工業大学の赤羽助教授、その他の方々から多くの貴重な御意見を頂きました。厚く御礼を申し上げます。なお、本研究の一部は平成2年度文部省科学研究費一般研究(C)の補助を受けていることを付記し、ここに謝意を表します。

## 7. あとがき

サグにおけるボトルネック現象は日本において見られるのみで、日本以外の国からは少なくとも発表されていない。しかし、この現象は必ずしも日本特有ではないのであろう。

\* Edie や Foote<sup>11)</sup> は、1960年代にアメリカ Holland トンネルにおいて、トンネル内の渋滞発生を防ぐためにトンネル入口で交通量メータリングを行った結果、渋滞を予防し、その結果交通容量も増加できたことを報告している。彼らはこの渋滞がサグによって起きていることを認識していないかったが、今考えてみると、このトンネル内での渋滞現象は本研究の対象と同様にトンネル内のサグによるものと思われる。

\* サグでの渋滞現象はサグで速度低下によるものであり、この速度低下は勾配の変化または勾配差によるものである。しかしすべてのサグで渋滞が生じているわけではないので、勾配差だけが決定的な要素ではないようである。例えば、サグでの見通しも非常に大きな影響を与えていくようである。これが日本以外の国で渋滞が生じにくい理由の一つかも知れない。この点においては今後の研究に期待したい。

## 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, 1984.
- 2) 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, 1986.7.
- 3) Koshi, M., M. Kuwahara and H. Akahane: Capacity of Sags and Tunnels on Japanese Motorways, *ITE Journal*, May 1992.
- 4) 越 正毅、桑原雅夫、赤羽弘和：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, 土木学会論文集, No.458/IV-18, 1993.1.
- 5) 邢 健: A Study on Car-following Behaviour, 東京大学修士論文, 1989.9.
- 6) 大口 敬: ファジィ推論を用いた車両の追従モデル, 土木計画学研究・講演集, No. 11, 1988.11.
- 7) 邢 健, 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, Vol. 14 (1), 1991.11.
- 8) 邢 健: A Study on the Bottleneck Phenomena and Car-following Behaviour on Motorways, 東京大学学位論文, 1992.9.
- 9) Koshi, M., M. Iwasaki and I. Ohkura : Some Findings and Overview on Vehicular Flow Characteristics, *Proc. 8th Intl. Symp. on Transp. and Traffic Theory*, 1981.
- 10) Box, M.J.: A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods, *Computer Journal* 8, 42.
- 11) Edie, L.C. and R.S. Foote: Effect of Shock Waves on Tunnel Traffic Flow, *HRB 39*, 1960.

(1993.11.5 受付)

## A STUDY ON THE BOTTLENECK PHENOMENA AND CAR-FOLLOWING BEHAVIOUR ON SAGS OF MOTORWAYS

Jian XING and Masaki KOSHI

It has been observed on Japanese motorways recently that congestions occur at the bottlenecks such as sags and tunnels. This bottleneck phenomena have not been studied yet in details because of the difficulty in acquisition of data from real traffic flow. The paper deals with the dynamic phenomena of traffic flow based on field observations at sag. A hypothesis of the mechanism of generation and propagation of deceleration waves is suggested from the viewpoint of car-following behaviour and verified using the data observed. The parameters of a car-following model are estimated for each vehicle and some car-following simulations are done. It is found that the identified car-following model is able to simulate the real traffic flows.