

高速道路サグにおける 渋滞の発生と道路線形との関係

大口 敬¹

¹正会員 博士(工学) 日産自動車株式会社 社会・商品研究所 交通研究室 (〒104-23 東京都中央区銀座 6-17-1)

近年、都市間高速道路本線上のサグをボトルネックとして、しばしば長時間、長い渋滞車列を形成する大渋滞が発生している。しかし全てのサグがボトルネックとなるわけではない。本研究では、渋滞を起こすサグと起こさないサグの比較を行い、渋滞発生条件を見出すことを目的とする。サグにおける渋滞現象は多数の運転者の運転挙動に起因して生じる。そこでまず運転者に影響を与えると思われる道路線形、道路構造及び交通条件などの各種要因を洗い出す。特に運転者から見た道路形状の視認性について検討する。これにもとづきサグにおける渋滞発生条件を体系化する。最後にサグにおける渋滞発生を抑制する方策について検討する。

Key Words : motorway, sag, traffic capacity, road alignment

1. はじめに

(1) 目的

近年我が国では、都市間高速道路の本線上において慢性的に大渋滞が起こっており、その社会的、経済的な損失は膨大なものと考えられる。また渋滞の末尾における追突事故の危険性という安全面の問題も大きい。こうした渋滞現象の多くは、サグやトンネルを交通容量上の隘路(ボトルネック)とした現象である。一般にサグとは縦断線形の凹部の底部を指すが、本稿では図-1に示す縦断曲線部全体を指すものとする。このときのサグやトンネルの交通容量は、交通の錯綜や外的要因による交通の中断がなく連続な交通流の実現する単路部区間の容量とされる4,000[台/時/2車線]と比較すると、渋滞前で約8割、渋滞中には約6割程度にまで低下する。こうした容量低下現象は個々の運転者の挙動特性に起因するものと考えられる。

しかしすべてのサグで渋滞が発生するわけではなく、渋滞が発生しないサグも多く存在する。運転者の運転挙動は、サグにおける道路線形、道路構造及び交通流条件などにより影響される。その結果、ある条件が満たされるサグは渋滞を起こすが、そうでないサグでは渋滞を起こさないものと考えられる。

本研究は、渋滞を起こすサグと起こさないサグについて、運転者が受けていると考えられる影響要因を分析し、渋滞が発生する条件を解明することを目的としている。さらにサグで渋滞を起こさないためのサグの設計方法、及び交通運用上の方策について、示唆を得ることを目指している。

(2) 既往の研究

高速道路本線上における渋滞現象に関する研究は、近年になって我が国で取り上げられるようになったものであり、比較的新しい研究分野である。

1970年代後半から、東名高速都夫良野トンネル、中央道小仏トンネルなどが渋滞発生箇所として知られるようになり、日本道路公団によりトンネルにおける渋滞現象の実態調査や渋滞対策が行われるようになった。このトンネルの渋滞現象に対して実証データをもとに初めて科学的考察を加えたのが、1984年の越¹⁾による論文である。その後越²⁾は、サグにおける同様の渋滞現象についても考察を加え、個々の車両の運転者の運転挙動モデル(追従モデル)仮説を立て、この運転挙動特性に起因して渋滞が発生することを示した。

このような渋滞現象に関する研究として、越³⁾は、疎密波現象など渋滞流に特徴的な現象の分析を行い、その後さらに越^{4),5)}は、サグとトンネルにおける渋滞のデータが蓄積されてきたことを背景に、これらの渋滞現象に特徴的な容量特性について新たな知見を加えた。

赤羽⁶⁾は、車間距離、速度、加速度などの計測システムを備えた実験車両を開発し、運転者の運転挙動に関する基礎的分析を行った。Xing^{7),8)}は、サグで渋滞が起こる場面をカイトバルーンを用いて上空からビデオで撮影し、その画像解析によりサグ付近での各車両の運転挙動を分析して越による追従モデルの妥当性と限界を示した。尾崎^{9),10)}は、2台以上前方車の状況も加味した運転挙動特性を精査し、サグにおける現象を再現できるモデルについて再検討している。

一方海外では、越⁵⁾が指摘する1960年頃のニュ

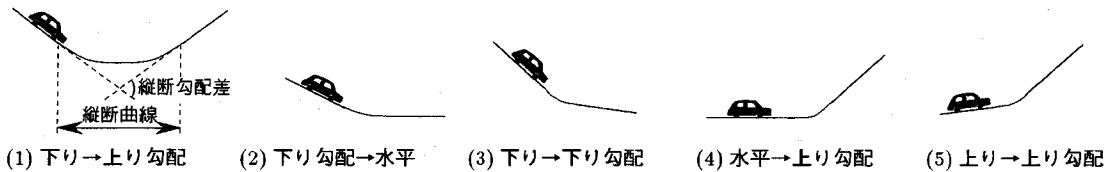


図-1 サグの概念図

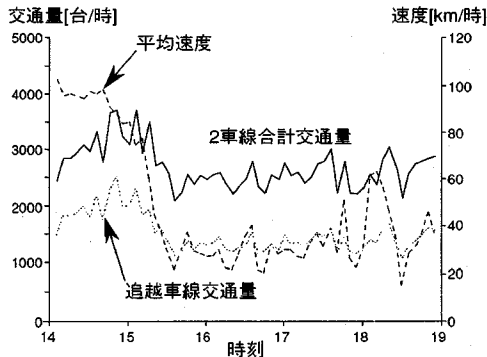


図-2 秦野付近サグ約1km上流の交通状況の時刻変動

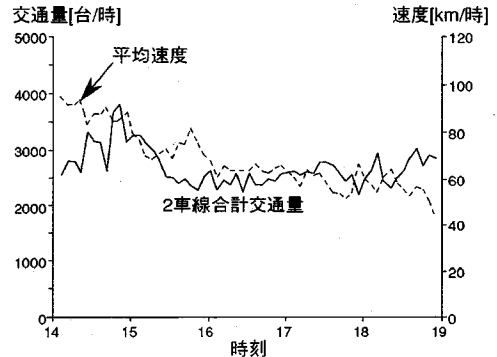


図-3 秦野付近サグ約1km下流の交通状況の時刻変動

ーヨークのリンカーントンネルや、赤羽¹¹⁾により紹介されている M25 などのイギリスの高速道路などにおいて、容量低下現象が起きるようである。これらの現象は、日本におけるトンネルやサグにおける現象と同様のものと推測される。しかし海外では、こうした現象の発生メカニズムや容量特性を取り扱った研究は見当たらない。

以上の研究では、実際に渋滞が発生しているトンネルやサグにおける交通流特性について、巨視的、微視的の両側面ともかなり詳しく分析されている。しかしこれらの研究では、渋滞が発生する原因についての網羅的、系統的な検討は為されていない。すなわち、実際にはサグによって渋滞を起こすものと渋滞を起こさないものがあり、なぜあるサグが渋滞を起こし、別のサグが渋滞を起こさないのかを説明づける論理を得るには至っていない。本研究はこうした説明論理を見出すことを目的としている。

2. サグにおける渋滞の特徴

(1) サグの容量特性

図-2～図-4は、東名高速上り秦野付近(46.99kp)のサグにおける渋滞発生の様子を示したものであり、図-2はサグの直上流(約1km)、図-3は逆に直下流(約1km)、そして図-4は上流側約4kmの地点に、それぞれ設置されている車両感知器により観測された5分間交通量と平均速度の時刻変動を示している。

図-2によれば、15時過ぎに2車線合計交通量(5分

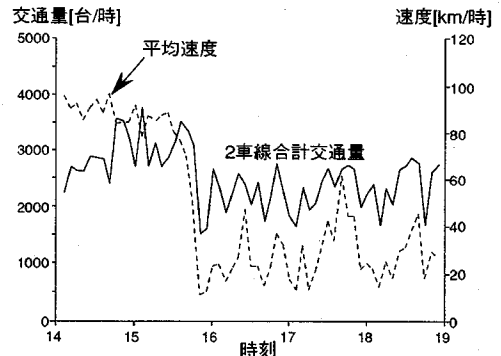


図-4 秦野付近サグ約4km上流の交通状況の時刻変動

間交通量の1時間当り換算値)が約3,500[台/時]に達したところで、平均速度が急激に低下して渋滞が始まったことが判る。また交通量は、渋滞発生直前が最も高く、渋滞発生後は徐々に低下し、16時以降は約2,500[台/時]となってだいたい安定する。

一方図-3によれば、この地点では平均速度が約60km/hまでしか低下せず、また図-2と比較して16時以降における交通量と平均速度の時刻変動が非常に少ない。これらの事は、図-2と図-3の2地点間のどこかに渋滞の先頭があり、図-3の地点は、ここからの発達加速の途中状態にあるものと解釈できる。

また図-4の場合には、平均速度が急激に低下するのが16時少し前であり、図-2の地点よりも30分ほど遅れて渋滞状態になったことがわかる。つまり、この渋滞がこの2地点間の距離約3km伸びるのに約30分を要したことが判る。またこの地点は、図-2の場合と比較

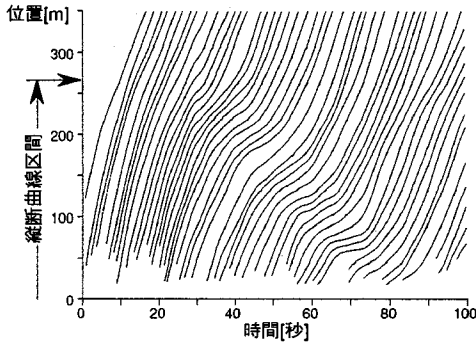


図-5 秦野付近サグにおける車両の運動軌跡⁸⁾

して交通量及び速度の時刻変動がかなり大きくなっている。これは越ら³⁾が指摘する渋滞流中における疎密波現象の発生を意味している。

車両感知器からは、高速道路の一断面の交通現象しか捉える事ができないが、このように解釈すれば、渋滞発生位置を2箇所の車両感知器地点間にまで特定することができる。この場合、図-2と図-3の地点間で渋滞が発生したことが判るが、その位置を更に特定するためには実際に現地調査を行う必要がある。

図-5は、カイトバルーンを用いて上空から秦野サグ付近をビデオ撮影し、画像解析によりサグ付近での各車両の運動軌跡を求めたもの⁸⁾である。サグの縦断曲線の終端付近から減速波が発生し、渋滞の発生の様子が見て取れる。この東名高速上り秦野付近は頻りに渋滞が発生する場所であるが、複数回にわたる現地調査と、こうした上空からのビデオ観測による裏付けによって、個々の車両の挙動特性に起因して、サグで渋滞が発生することが初めて実証されたのである。

(2) 渋滞発生メカニズムの仮説

個々の車両の挙動特性に起因してサグで渋滞が起こるメカニズムは、次のような仮説で説明できる。

- 1) サグにおいては縦断勾配に相対的な変化が生ずるが、運転者はこの増加した勾配による抵抗の増加分を補うほど十分なアクセル操作をせず、無意識のうちに速度低下を起こす。
- 2) 交通量が増大すると、各車両は車間距離の詰まった集団(車群)を形成するようになる。車群中の運転者は、速度低下にもかかわらず減速前の車間距離を維持しようとする傾向があるため、後方車は前方車より大きな減速をしてしまう。
- 3) こうした後方車ほど大きく減速する現象が将棋倒しの様に車群中を伝播する(減速波の上流増幅伝播)ことにより、車群後方の車両は低速走行または停止を強いられ、さらに後続車群がそこへ到着する

と継続的な渋滞となる。

- 4) 断面で車両の通過を観測すれば、後方車が車間距離を維持したまま減速すると、前方車よりその断面に到着する時刻が相対的に遅れる。言い換えれば、車頭時間が長くなり交通流率が低下する。従って減速波の発生直前にこのサグの最大の交通容量が実現し、減速波の発生と共に捌け台数は低下するのである。
- 5) 図-2からもわかるように、一般に交通量が増大すると追越車線利用率は高くなる。従って追越車線から先に渋滞が発生し、追越車線に低速な車列ができると走行車線へ車線変更する車両が増えて、最終的に両車線ともに渋滞に至る。
- 6) 運転者は、一旦低速走行または停止すると再び加速して速度を回復しようとするが、渋滞(減速)の原因が判らないために、車間距離が大きく空いてから緩慢に加速を開始する。これにサグにおける勾配変化も加担して発進加速は非常に緩慢になるため、渋滞発生後は捌け台数が極端に低くなる。こうして渋滞発生後のサグの交通容量は非常に低くなるのである。

これまでの研究によって上に述べた仮説は徐々に検証されてきているが、詳細にわたっては十分検証されているわけではない。しかしこれを否定する事実もないのでおおむね妥当なものと考えて良いであろう。

3. 渋滞を起こすサグ、起こさないサグ

(1) 研究対象区間

サグにおける渋滞の発生は個々の車両挙動特性に起因する。従って運転挙動に影響を与える要因をなるべく純粋に捉えるため、気象要因などの変動要因を排除し、車線数など揃えられる条件はできるだけ揃えるものとする。ここでは次のような条件を満たすサグ、及び渋滞現象に対象を限定する。

- a) 片側2車線区間の高速道路本線上の単路部のサグを対象とする。登坂車線などにより一時的に片側3車線の区間が近傍にあるものは対象とするが、連続的に片側3車線となる区間のサグは対象としない。また近傍に分合流部、及びトンネルがある場合も対象外とする。
- b) 交通需要が十分に多い路線を対象とする。
- c) 車両感知器データ、又は日本道路公団による渋滞調査が継続的に行われ、資料として残されている路線を対象とする。道路線形データについても同様である。
- d) 雨天などの天候の悪い時を除いたケースを対象とする。雨天時の運転挙動は、路面が乾いていて視

界が良好な場合とは異なるものと考えられる。

- e) 昼間に発生した渋滞のみを対象とする。夜間の運転挙動は昼間とは異なるものと考えられる。
- f) 交通需要の集中により、サグが原因となって最初に渋滞が発生する場合のみを対象とする。すなわち、他の要因（事故、工事、別の隘路区間など）によって最初に渋滞が起こり、その後その要因が解消して渋滞車列の先頭が当該サグに移動するような場合は対象外とする。

現地調査の可能性も考慮して首都圏の高速道路を対象とし、以上の条件をあてはめ、

- ・東名高速厚木 IC(Interchange)～大井松田 IC 間、
 - ・中央道国立府中 IC～大月 IC 間
- を本研究における対象区間に選定した。またこの対象区間における渋滞の分析に用いたのは、

- 1) 車両感知器データ（5分間交通量、平均速度）

東名高速：1988年5, 8月, 1990年8月

中央道：1992年5, 7, 8月

- 2) 渋滞調査

東名高速：「東名道定期情報」または
「東名定期情報（渋滞図）」
(1988年5, 8月, 1990年8月)

中央道：「中央自動車道交通渋滞図」
(1992年5, 7, 8月)

- 3) 道路線形（縦断、平面）データ

- 4) 走行車両から見た道路の見え方を撮影した写真以上4種類のデータである。

(2) 渋滞を起こすかどうかの判断方法

a) 東名高速の場合

行楽、帰省シーズンの5月、8月の渋滞調査から渋滞の発生した場所と日時及び天候を調べ、これを車両感知器データにより検証する。

渋滞調査では渋滞先頭位置をキロポストで示しているが、必ずしも一定の地点ではない。一例として東名高速下り方向伊勢原バス停付近は渋滞の名所として有名であるが、渋滞調査では、38kp, 39kp, 39.9kp, 40kp, 40.8kp, 41kp, 41.3kp, 41.5kp, 42kpといった様々な地点が渋滞の先頭位置として記録されている。しかし車両感知器データを分析してみると、いずれの場合も39.35kp付近を底とするサグ、またはここから41.7kp付近まで続く約2.5kmに及ぶ長い上り坂区間が原因となる渋滞現象であることが判った。この上り坂の勾配は2.0[%]であり、この勾配が容量低下の原因とは考えにくい¹²⁾。従って勾配差（サグ前後の縦断勾配の代数差）が2.6[%]であるサグ（39.35kp）が渋滞の原因であると解釈できる。

他にも、渋滞調査では渋滞原因が自然の渋滞とされながら、車両感知器からは何らかの事故（Incident）の

表-1 渋滞を起こすサグと起こさないサグ

路線	地点名 (kp)	勾配差 Δ[%]	下り	上り
東名	伊勢原 (39.35kp)	2.6	○(1)	×(1)
東名	鶴巻 (44.09kp)	1.7	×(1)	×(1)
東名	秦野 1(46.99kp)	2.3	○(5)	○(3)
東名	秦野 2(48.45kp)	1.9	×(5)	×(3)
東名	中井 1(52.80kp)	8.2	×(1)	○(1)
東名	中井 2(54.19kp)	4.6	×(1)	×(1)
中央	日野 (20.43kp)	2.4	○(4)	×(2)
中央	石川 (22.87kp)	3.1	×(1)	○(1)
中央	元八王子 (31kp)	3.0	○(1)	×(1)
中央	高尾 1(35.42kp)	2.7	×(1)	×(1)
中央	高尾 2(37.11kp)	2.0	×(5)	×(3)
中央	小原橋 (42.12kp)	3.4	×(3)	×(5)
中央	相模湖 (43.38kp)	8.0	×(1)	○(1)
中央	藤野 (47.49kp)	3.4	×(1)	×(1)
中央	小淵橋 (48.71kp)	2.8	×(1)	×(1)
中央	鶴川大橋 (52.01kp)	5.3	○(1)	○(1)
中央	中野 (61.88kp)	6.9	○(1)	○(1)
中央	猿橋 (65.49kp)	3.9	×(1)	×(1)

注) カッコ内の数値は図-1に示したサグのタイプを指す

存在を示唆するケース、渋滞調査による渋滞発生位置や時刻が車両感知器によるデータとずれているケースなどが見られ、このような場合は、基本的に車両感知器データにもとづいて、サグが原因で初めに渋滞が発生していると認められたものについてのみ、対象とする渋滞現象とした。

b) 中央道の場合

車両感知器の設置場所が少ないので、車両感知器データによって裏付けが得られる区間は対象区間のごく一部である。裏付けが得られる区間については、サグを原因として初めに渋滞が発生していることが検証されたものだけを対象とする渋滞現象とした。車両感知器による検証ができない区間については、基本的には渋滞調査をそのまま信用したが、可能な限り現地調査による確認を行った。

(3) サグの分類

表-1は、対象区間において3.-(1)節に示したa)-c)の条件を満たす勾配差1.5[%]以上のサグを、地点名とキロポストを付けて列挙したものである。またこの表には、上り方向と下り方向別々に、3.-(1)節に示したd)-f)の条件を満たす渋滞現象を起こすサグに○、起こさないサグに×を付けて示す。なお中央道の元八王子(31kp)のサグは、実際には勾配差1.3[%]と1.7[%]の2つのサグが連続している区間であるが、ここでは全体を一つのサグとして扱っている。

東名高速で6地点、中央道で12地点、上下方向を別のサグとして数えると合計で36箇所となるが、そのうち渋滞を起こすサグが12箇所である。また同一地点でも上下両方向が渋滞するわけではないことが判る。

表-2 サグの縦断曲線半径の設計基準 (文献¹³⁾より抜粋)

設計速度 [km/h]	縦断曲線の最小半径 [m]	
	基準値	推奨値
120	4,000	6,000
100	3,000	4,500
80	2,000	3,000
60	1,000	1,500
50	700	1,000

注) 推奨値=「望ましい値」¹³⁾

表-3 視覚上必要な縦断曲線長 (文献¹³⁾より抜粋)

設計速度 [km/h]	最小縦断曲線長 [m]
120	100
100	85
80	70
60	50
50	40

表-4 サグにおける設計縦断曲線長と設計基準視距

設計速度 [km/h]	最小縦断曲線長 [m]						視距 [m]
	勾配差 [%]						
	1	2	3	4	6	8	
120	100	100	120	160	240	320	210
100	85	85	90	120	180	240	160
80	70	70	70	80	120	160	110

4. 従来の道路線形設計基準値と適用値

(1) 設計基準

これらのサグが交通容量上のボトルネックとなって渋滞を起こすということは、従来の道路設計マニュアルなどにおいては予想されていなかったことである。従来のサグ区間における縦断曲線(凹型曲線)設計基準は次のように規定されている¹³⁾。

- a) サグにおける縦断曲線については、勾配変化による衝撃緩和を目的として最小の縦断曲線半径(放物線として設計される縦断曲線を円弧で近似した円半径)を設計基準値として規定している。表-2に、設計速度に応じたこの縦断曲線半径の設計基準値を示す。また設計基準値は絶対最小限界の値であるのに対し、この表に示す「推奨値」とは安全性、快適性の観点から事実上の基準値として設定されるものである。
- b) 縦断曲線の長さについては、視覚上の必要長(短すぎると線形が急に折れ曲がって見える)により設計速度に応じて最小値が規定されている。表-3にこれを示す。

なお、米国における縦断曲線の設計基準値はやはり衝撃緩和によって規定されており、その値は日本の場合より僅かに大きいがほぼ同程度の値が規定されている¹⁴⁾。

このようにサグの縦断曲線は、縦断曲線半径と縦断曲線長の両方に基準値が存在し、双方を満たす必要がある。勾配差が Δ [%]のサグで縦断曲線半径が R_v [m]のとき、縦断曲線長: L_v [m]は式(1)で求まる。

$$L_v = \frac{\Delta}{100} R_v \quad (1)$$

表-4は、表-2と式(1)及び表-3にもとづいて、勾配差1[%], 2[%], 3[%], 4[%], 6[%], 8[%]の場合の設計基準最小縦断曲線長を計算した例である。また設計基準最小視距(路上に置かれた障害物に対して制動停止が可能な最小距離)を一併に示す。

表-4から判るように、勾配差が小さい場合には縦断曲線長は視覚上の必要長で規定され、設計速度が低い方がその範囲は広がる。またこの最小縦断曲線長と最小視距を比較すると、勾配差6[%]以上では視距よりも縦断曲線長の方が長くなる。もしも視距と縦断曲線長がどちらも設計基準値ぎりぎり設計されたと仮定すると、勾配差が6[%]以上となるサグでは、運転者は縦断曲線の始点から見たとき縦断曲線の終端を見通すことができず、この時点ではサグにおいて勾配がどこまで変化するかを知ることができない。

(2) 実際の適用値

表-5には、実際のサグにおいて適用されている縦断曲線とその設計基準値を示す。ここには、設計基準値と共に設計上の推奨値及び平面線形との組み合わせで視覚的な連続性が得られるとされる目安値¹⁵⁾を示す。この表から明らかなように、実際に適用されている縦断曲線半径は設計基準値の4~40倍程度であり、標準的には5~10倍程度である。また最もゆるい基準である目安値と比較しても実際の適用値の方が大きく、最大で約10倍もの値が適用されている。このように実際に適用されている値が基準値よりも極端に大きくなる理由は、「縦断曲線は、平面線形との組み合わせによる排水性、安全性、及び快適性を満たす範囲内で、なるべく大きくとったほうがよい¹³⁾」とされているためであり、縦断曲線半径および縦断曲線長の最大値に関する歯止めが存在しないためである。ここには、平面曲線との調和を考えて視覚的になるべく滑らかに道路を見せるようとする設計思想があるように思われる。

そのため実際のサグにおいては設計基準よりも極端に大きな縦断曲線が適用されており、設計基準が十分に機能していないように思われる。また表-5に示すように設計基準視距と縦断曲線長の実際の適用値を比較してみると、基準値の2.5~9倍の視距が確保されていたとしても、各サグにおいて縦断曲線始点位置にいる運転者はその終端を見通すことができない。従って縦断曲線始点から見て勾配がどこまで変化するか判ら

表-5 主なサグの縦断曲線の適用値と設計基準値

路線名	地点名 (kp)	適用値		設計基準値など						設計基準 視距
		R_v	L_v	R_v [m]			L_v [m]			
		[m]	[m]	基準値	推奨値	目安値	基準値	推奨値	目安値	
東名	伊勢原 (39.35kp)	26,923	700	4,000	6,000	12,000	104	156	312	210
東名	鶴巻 (44.09kp)	82,353	1,400	4,000	6,000	12,000	100	102	204	210
東名	秦野 1(46.00kp)	21,739	500	4,000	6,000	12,000	100	138	276	210
東名	秦野 2(48.45kp)	31,579	600	4,000	6,000	12,000	100	114	228	210
東名	中井 1(52.80kp)	8,098	664	2,000	3,000	8,000	164	246	656	110
東名	中井 2(54.19kp)	12,609	580	2,000	3,000	8,000	92	138	368	110
中央	日野 (20.43kp)	53,333	1,280	4,000	6,000	12,000	100	144	288	210
中央	石川 (22.87kp)	38,710	1,200	4,000	6,000	12,000	124	186	372	210
中央	元八王子 (30.25kp)	76,923	1,000	2,000	3,000	8,000	70	70	104	110
中央	元八王子 (31.49kp)	58,824	1,000	2,000	3,000	8,000	70	70	136	110
中央	相模湖 (43.38kp)	10,000	800	2,000	3,000	8,000	160	240	640	110
中央	藤野 (47.49kp)	13,714	480	2,000	3,000	8,000	70	102	272	110
中央	鶴川大橋 (52.01kp)	18,868	1,000	2,000	3,000	8,000	106	159	424	110
中央	中野 (61.88kp)	11,594	800	2,000	3,000	8,000	138	207	552	110
中央	猿橋 (65.49kp)	12,308	480	2,000	3,000	8,000	78	117	312	110

いようなサグが多数存在すると思われる。

5. 渋滞の発生を規定する要因

(1) 考え方

対象とする 36 箇所のサグのうち、表-1に示すように渋滞するサグとしないサグが存在する理由について、3-(1)節に示した車両感知器データ、道路線形データ及び撮影された写真などを用いて検討した結果、以下に示す 6 つの要因が主な説明要因として抽出された。

a) 勾配差: Δ [%]

サグの前後の縦断勾配の代数差で与えられる勾配差: Δ は、それが運転挙動に与える影響が無視できるほど小さければ渋滞は起きない。従って表-1では $\Delta < 1.5$ [%] となるサグを省略している。

b) 上流勾配区間長: L_u [m]

サグにおいて減速が生じるためには、その上流区間の縦断勾配に運転者が慣らされてしまっている必要がある。その状態に運転者が慣らされてしまうために、サグの勾配変化に運転者は対応できないのである。従ってサグの上流の縦断勾配区間の長さ: L_u があまり長くない場合には、運転者が慣らされてしまう時間が足りないために、減速は起こらず渋滞は発生しない。なお、ここで a) に示す理由から、上流に 1.5 [%] 以上の勾配変化が生じるまでは同じ縦断勾配区間として考える。

c) 下流標高差: A_d [m]

同様にサグ下流の縦断勾配区間を下流に 1.5 [%] 以上の勾配変化が生じる縦断曲線の始点までと定義すると、これがあまり短い場合には後方車両に影響を与えるほどの速度低下が生じず、渋滞が起きないものと考えられる。ここではサグ下流の縦断勾配区間の終端から、サグ上流区間の勾配方向へ降ろした垂線の長さを

相対標高差: A_d と定義して、これを用いて下流側の縦断勾配区間の影響を評価する。

d) 直上流平面半径: R_u [m]

サグの底(縦断曲線の中心点)が含まれる平面曲線(半径: R_h) の一つ上流側の平面曲線(半径: R_u) に着目し、 R_h よりも R_u が小さく、 R_u が運転者に速度調整(減速)を強いるほど急なカーブである場合には、運転者はカーブで低下した速度をサグ付近で回復しようとするため、サグにおける速度低下現象は起こりにくいものと考えられる。

e) 上流ボトルネック距離: D_b [km]

サグの上流に交通容量上の隘路が存在し、その間に IC などによる交通量の流入がなければ、上流で交通量が絞られるので当該サグは渋滞を起こさない。しかしこのような条件を満たす隘路が存在しても、十分に距離が離れていれば、当該サグに達するまでに再び大きな車群が形成され、減速とその増幅伝播が生じて渋滞が起ることもあり得る。従ってこのような条件を満たす隘路の有無、及びその隘路(ボトルネック)までの距離: D_b により渋滞の発生は左右される。

f) サグの視認性

サグにおいて無意識のうちに生じる減速は、勾配変化量を適切に認識できないために生じるものと考えられる。従って「勾配変化量の視認性」の良否により減速量が異なるであろう。また「勾配変化量の視認性」が良好であっても勾配変化位置が適切に認識できない場合には、勾配変化に対して適切なタイミングでアクセル操作ができないために、やはり減速が生じてしまう。従ってこの「勾配変化位置の視認性」も減速量に影響するものと考えられる。

以上 6 要因のうち、a)~e) を説明する変量を模式的に示したものが図-6 である。また f) に示した 2 種類の視

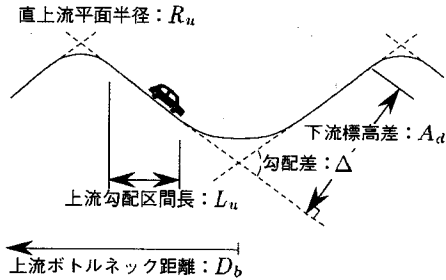


図-6 渋滞の発生を規定する変量の定義

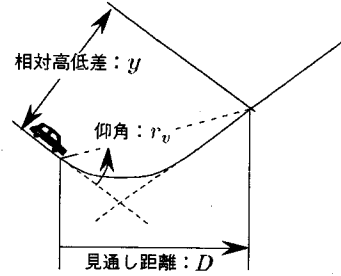


図-7 見通し距離における相対高低差と仰角の定義

認性については、次節 5.-(2)において詳しく検討する。

(2) サグの視認性の評価

a) 見通し距離

5.-(1)節に示した2種類のサグの視認性は、縦断線形、平面線形、および道路形状の見通しの良否により規定される¹⁶⁾。ここで言う見通しは、いわゆる視距とは微妙に異なる。視距は路面上の規定の高さの障害物が認識できる最大距離であるが、ここで定義する見通し距離は、道路形状が認識できる最大距離を意味しており、路面が必ずしも認識される必要はなく、路線の描く形状が認識できればよい。この見通し距離は、切土法面・遮音壁などの視程障害物との側方余裕の大きさによって大きく影響される。

視距の場合と同様で、この見通し距離を道路上の任意の地点について計算することは非常に困難である。ここでは各サグについて、そのサグに差しかかった運転者から見た見通しの状態を評価するために、サグの縦断曲線の始点位置から見た見通し距離： D [m]を取り上げ、これを次のようにして計算する。

- 1) 走行車両から撮影した道路の見え方の写真を参考に、見通しが平面曲線の内側の視程障害物（切土法面や遮音壁など）で塞がれて決定される場合には、まず側方余裕を調べる。
- 2) 側方余裕は、標準横断面図を参考にして、写真をもとに見通しを塞ぐ位置の側方余裕 (C_L [m]) を推定する。
- 3) 縦断曲線の始点位置とその見通し距離だけ下流地点とが共に平面円曲線区間にある場合には、側方余裕 (C_L)、平面半径 (R_h [m])、及び見通し距離 (D_{calc} [m]) が次の関係式を満たす。

$$C_L = R_h \left(1 - \cos \frac{D_{calc}}{2R_h}\right) \approx \frac{(D_{calc})^2}{8R_h} \quad (2)$$

- 4) 視点位置から平面円曲線区間の終点位置までの距

離を d [m] とするとき、 $D_{calc} \leq d$ となる場合には、この計算値が見通し距離となる ($D = D_{calc}$)。

- 5) $D_{calc} > d$ となる場合、または視点が平面円曲線区間の手前の緩和区間にある場合は、 D_{calc} を参照にしておよその見通し距離 (D_{round} [m]) を推計し、または写真からこのおよその値を推定 (D_{photo} [m]) して、これにもとづき見通し距離 (D) を推定する。
- 6) 写真からS字線形のために片方の側方余裕からは見通し距離が単純には求まらないことが判る場合、及び写真で反対方向の車線が見えたり側方構造物を超えて下流側の道路形状が見える場合には、直接写真を見て (D_{photo}) 見通し距離 (D) を推定する。

なお表-1に示す36箇所のサグのうち、中央道の高尾2(37.11kp)、小原橋(42.12kp)、小淵橋(48.71kp)については走行車両からの撮影写真が得られなかったため、また元八王子(31kp)については、2つのサグが連続しており平面線形がS字区間で複雑となるため、ここでは除外する。従って見通し距離を計算したのは28箇所のサグである。

b) 見通し距離における相対高低差と仰角

5.-(2)-a)節で求められた見通し距離： D となる地点から縦断曲線始点の縦断勾配方向へ降ろした垂線の長さを、相対高低差： y [m]とする。また相対高低差を見通し距離で割ったものは、見通し距離における路面高の視点位置から見た仰角： r_v [radian] ($r_v \approx y/D$)を近似的に表わすことになる。図-7に y と r_v を模式的に示す。 y 及び r_v は、運転者から見た時に、サグにおける勾配変化のために勾配変化のない場合よりも相対的に路面が高く見える度合いを表現している。従ってこれによりサグの「勾配変化量の視認性」を評価できるものと考えられる。 y 及び r_v は、見通し距離 (D) と縦断曲線長： L_v [m]の大小関係により計算が異なる。

- i) $D \leq L_v$ の場合

$$y = \frac{D^2}{2R_v}$$

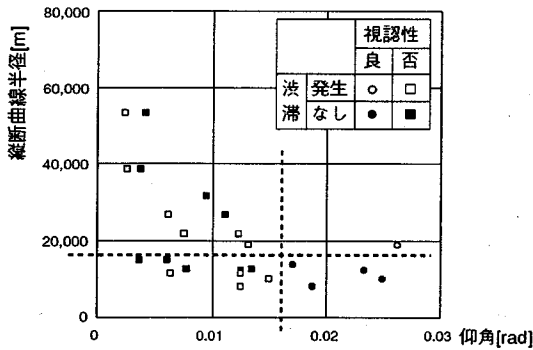


図-8 仰角-縦断曲線半径上で見た視認性と渋滞発生

$$r_v = \frac{D}{2R_v} \quad (3)$$

ii) $D > L_v$ の場合

$$y = \frac{L_v(2D - L_v)}{2R_v}$$

$$r_v = \frac{L_v(2D - L_v)}{2R_v D} \quad (4)$$

c) 視認性と渋滞の発生

図-8には、見通し距離を計算した28箇所のサグについて、仰角： r_v と縦断曲線半径： R_v の関係を示す。また学生等数人に簡単なアンケートを行い、縦断曲線の視点位置から見た実際の見え方を撮影した28箇所の写真の中から一見して前方に勾配変化があることがわかるサグを抽出してもらった。このアンケートでは、主に「勾配変化量の視認性」を評価しているものと考えられる。この評価において抽出率が高かったサグを視認性が良好なサグとし、図-8において○及び●で示す。この図からわかるように、「勾配変化量の視認性」は r_v との関連性が強く、この視認性が良好であるということは、

$$r_v > 0.017[\text{radian}] \approx 1[\text{degree}] \quad (5)$$

が成立するものと考えてよさそうである。

一方図-8に示した「勾配変化量の視認性」が良好とされるサグであっても、渋滞の発生するサグ（図中の○：鶴川大橋（上り）のサグ）もある。ここで「勾配変化位置の視認性」については、縦断曲線半径： R_v を用いて評価できるものと考えられる。すなわち、 R_v が大きくなって縦断曲線が緩やかになると「勾配変化位置の視認性」が低下するのである。鶴川大橋（上り）のサグの場合は $r_v = 0.263[\text{rad}]$ で「勾配変化量の視認性」は良好であるが、縦断曲線半径は $R_v = 18,868[\text{m}]$ とかなり大きく、「勾配変化位置の視認性」が悪いために渋滞に至るものと考えられる。

以上のことから、この2種類の視認性を意味する指標 r_v と R_v について、

$$r_v > 0.017[\text{radian}] \text{ かつ}$$

$$R_v < 14,000[\text{m}] \quad (6)$$

が成立するサグにおいては、2種類の視認性が共に良好に確保されて渋滞は起きにくいものと考えられる。逆に渋滞を起こすサグは、

$$r_v < 0.017[\text{radian}] \text{ または}$$

$$R_v > 14,000[\text{m}] \quad (7)$$

という条件を満たしている。

(3) 渋滞発生の条件

サグの視認性だけでは全ての渋滞の発生は説明できない。5-(1)節に示した他の5つの要因も含め、表-6に対象とする36箇所のサグの各要因の評価量を示す。ここで渋滞を起こすものは○印で示す。表-7には、表-6にもとづく検討から得られた渋滞発生の条件をまとめたものを示す。なお表-6には、表-7に示した「渋滞が発生しない」条件を満たす各要因の評価量については太字で示している。

対象36箇所のサグのうち、渋滞を起こす12箇所のサグは、表-7における「渋滞が発生する」条件を全要因について満たす。一方渋滞を起こさない残りの24箇所のサグについては、2箇所を例外として他の22箇所では、最低1つの変量について「渋滞が発生しない」条件を満たしている。この例外の2箇所は伊勢原（上り）と元八王子（上り）であり、「渋滞が発生する」条件を全て満たしていながら渋滞を起こしていない。このような例外が生じることは、渋滞発生を規定する要因が他にも存在することを示唆している。従ってどのようなサグについても成立するような、一般的な渋滞発生の判別条件を導くためには、さらに多くのデータの積み重ねが必要である。なお、今のところ簡単な観測と分析により表-7に示した条件の検証を行った範囲内では¹⁷⁾、これを否定するような反証は見つかっていない。

6. 結論

本研究では、都市間高速道路本線上のサグ36箇所を対象として、渋滞発生の条件を規定する要因を実証的に示すことができた。また以上の分析にもとづけば、サグにおける渋滞発生を抑制する方策として次に示す幾つかを考えることができる。

- 設計基準を満たす範囲で縦断曲線をなるべく短く、つまり縦断曲線半径： R_v をなるべく小さくする。これにより「サグの勾配変化位置」が視認しやすくなり、渋滞が起りにくくなる。現状では大半が設計基準値の5～10倍程度という運用状況であるが、渋滞を起こさないためにはこれを設計基準値に近づけたほうがよい。
- サグ付近及びその上流の平面半径を大きくし、切土法面や遮音壁などの視程障害物との側方余裕を

表-6 サグの渋滞発生の各要因の評価量

地点名(上下)	渋滞発生有無	見通しと視認性評価量				道路線形など各要因の評価量				
		D [m]	y [m]	r_v [rad]	R_v [m]	Δ [%]	L_u [m]	A_d [m]	R_u [m]	D_u [km]
相模湖(下り)		500	12.5	0.0250	10,000	8.0	790	76.0	400	—
猿橋(上り)		600	14.0	0.0234	12,308	3.9	1,750	22.6	1,100	2.5
中井1(下り)		300	5.6	0.0188	8,098	8.2	570	41.0	1,500	—
藤野(下り)		480	8.2	0.0171	8,098	3.4	1,560	19.6	400	—
藤野(上り)		480	8.2	0.0171	8,098	3.4	820	47.5	260	—
鶴巻(上り)		700	3.0	0.0051	82,353	1.7	2,900	30.5	4,000	3.0
鶴巻(下り)		400	1.0	0.0024	82,353	1.7	2,360	43.4	3,000	4.5
秦野2(下り)		600	5.6	0.0094	31,579	1.9	1,460	11.0	2,500	1.5
秦野2(上り)		600	5.6	0.0094	31,579	1.9	1,320	15.8	3,000	—
高尾2(上り)		—	—	—	—	2.0	1,800	24.9	500	3.0
高尾2(下り)		—	—	—	—	2.0	1,690	33.5	700	6.0
小原橋(下り)		—	—	—	—	3.4	360	10.5	660	11.0
小淵橋(下り)		—	—	—	—	2.8	400	3.9	∞	—
小原橋(上り)		—	—	—	—	3.4	470	7.0	600	1.0
小淵橋(上り)		—	—	—	—	2.8	500	3.9	800	—
中井2(下り)		350	4.7	0.0135	12,609	4.6	590	86.5	550	—
高尾1(下り)		110	0.4	0.0037	14,963	2.7	650	53.3	500	4.5
高尾1(上り)		180	1.1	0.0060	14,963	2.7	1,690	6.8	400	4.5
中井2(上り)		350	4.7	0.0135	12,609	4.6	2,160	13.3	1,200	—
石川(下り)		300	1.2	0.0038	38,710	3.1	1,200	29.5	2,000	2.5
日野(上り)		450	1.9	0.0042	53,333	2.4	1,240	—	2,000	2.5
猿橋(下り)		300	3.7	0.0125	12,308	3.9	810	55.0	1,500	3.5
鶴川大橋(上り)	○	1,000	26.3	0.0263	18,868	5.3	2,748	136.4	1,100	—
相模湖(上り)	○	300	4.5	0.0150	10,000	8.0	1,300	50.4	800	—
鶴川大橋(下り)	○	500	6.6	0.0132	18,868	5.3	2,803	131.0	1,300	—
中野(上り)	○	300	3.8	0.0125	11,594	6.9	1,074	52.4	∞	6.0
中井1(上り)	○	200	2.5	0.0125	8,098	8.2	800	27.2	550	—
秦野1(上り)	○	540	6.6	0.0123	21,739	2.3	1,460	52.3	2,500	—
秦野1(下り)	○	330	2.5	0.0075	21,739	2.3	2,900	22.0	4,000	7.5
中野(下り)	○	150	0.9	0.0063	11,594	6.9	960	54.8	∞	—
伊勢原(下り)	○	330	2.0	0.0061	26,923	2.6	—	49.7	2,000	—
石川(上り)	○	200	0.5	0.0026	38,710	3.1	1,350	18.6	1,300	—
日野(下り)	○	250	0.6	0.0024	53,333	2.4	—	15.4	1,750	—
元八王子(下り)	○	—	—	—	—	3.0	—	—	—	—
元八王子(上り)		—	—	—	—	3.0	—	—	—	8.0
伊勢原(上り)		600	6.7	0.0111	26,923	2.6	2,380	—	3,000	7.5

表-7 渋滞発生の条件

サグの勾配変化の視認性	発生しない		発生する	
	良	否	良	否
サグの勾配差	$r_v > 0.017$ 及び	$r_v < 0.015$ 又は	$R_v < 14,000[m]$	$R_v > 18,000[m]$
サグの勾配差	Δ [%]	\leq	2.0	$>$
上流勾配区間長	L_u [m]	\leq	700	$>$
下流標高差	A_d [m]	\leq	15	$>$
直上流平面半径	R_u [m]	\leq	400	$>$
上流ボトルネック距離	D_b [km]	\leq	5.0	$>$

広くとる。サグであることをドライバーが認識しやすいうに、こうして見通し距離： D を長くすると、見通せる範囲内の道路仰角： r_v が大きくなり、「サグの勾配差の視認性」が確保され、渋滞発生を抑制できる。

- (c) 渋滞発生の条件を全て満たすことがないように調節する。「視認性」以外の変量を設計変更することは簡単には行えないが、それぞれ表-7の条件の境

界値周辺になりそうな場合には、少しの設計変更で渋滞の発生を抑制できる可能性がある。

- (d) 追越車線への車線利用の偏りを是正する。6要因とは直接関係がないが、渋滞発生のメカニズムから考えると、追越車線への車線利用率の偏りを是正できれば、サグにおける2車線合計の交通容量を増大させ渋滞発生を抑制できることが期待される。その方法としては、運転者教育によってキープレ

フトのマナーを徹底すること、サグの上流区間を片側3車線化することで右側車線の利用率を相対的に低下させること(過去このような例が東名高速大井松田IC付近57.39kpのサグの上り方向において見られた¹⁸⁾)、の2つが考えられる。

(a)の方策は現行の道路設計の方針とはむしろ逆である。また(d)で示したサグの上流区間の片側3車線化は、相対的に下り坂になる区間での付加車線の設置であり、現行の設計には無い考え方である。(b)や(d)で示したキープレフトの徹底に関しては、現行の設計指針や交通運用の考え方のより厳しい適用を求めるものである。

これらの方策は36箇所のサグを分析して得られたものであり、一般的にどのサグでも成り立つ方策として検証されたものではない。またサグによる渋滞の発生を防ぐためには、他にもっと有効な方策があるかもしれない。今後さらにデータの蓄積による実証的な裏付けにもとづいて、道路の設計や交通運用上の指針として適用にまで漕ぎつけることが重要であろう。

また、近年の渋滞発生の慢性化とともに片側3車線への拡幅工事が進められているが、片側3車線の場合の渋滞の発生の特徴や交通容量特性について、従来の考え方で良いのかどうか、データの蓄積と分析が必要である。同様に夜間、および雨天の場合には、昼間、天候が良好な場合とどのように異なるか、または同じであるのかを分析し明らかにする必要もあるであろう。

謝辞： 本論文は、東京大学工学部越正毅教授(現日本大学理工学部教授)、東京大学生産技術研究所桑原雅夫助教授の御指導による博士課程における学位論文の内容をまとめたものである。両先生には深謝の意を表したい。またデータや資料作成、交通流観測に便宜を図って頂いた日本道路公団、および関係各位には深甚なる御協力を賜った。ここに特記して謝意を表したい。

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，pp.32-38，1984。
- 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，pp.1-7，1986。
- 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，No.306，pp.59-70，1981。
- 4) Koshi, M., Kuwahara, M. and Akahane, H.: Capacity of Sags and Tunnels on Japanese Motorways, *ITE Journal*, Vol.62, No.5, pp.17-22, May, 1992.
- 5) 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，pp.65-71，1993。
- 6) 赤羽弘和，大庭孝之，桑原雅夫，越正毅：車両の走行挙動計測システム，土木計画学研究・講演集，No.11，pp.63-70，1989。
- 7) Xing, J., 大口敬，越正毅：高速道路単路部の交通流の動的的特性，土木計画学研究・講演集，No.14，pp.621-628，1991。
- 8) Xing, J., 越正毅：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，土木学会論文集，No.506/IV-26，pp.45-55，1995。
- 9) 尾崎晴男：自動車の追従走行挙動に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.14，pp.375-380，1991。
- 10) Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the Car-Following Behavior, *Proc. of 12th International Symposium on Theory of Traffic Flow and Transportation*, pp.349-366, 1993.
- 11) 赤羽弘和：ロンドン環状高速M25の現在と将来，高速道路と自動車，Vol.36，No.3，pp.15-21，1993。
- 12) 道路の交通容量，日本道路協会，1984。
- 13) 道路構造令の解説と運用，日本道路協会，1983。
- 14) *Traffic Engineering Handbook (4th Edition)*, ITE, Prentice-Hall Inc., 1992.
- 15) 交通工学ハンドブック，交通工学研究会，pp516-518，1983。
- 16) 大口敬：高速道路サグの道路構造と視認性，高速道路と自動車，Vol.35，No.11，pp.31-37，1992。
- 17) 大口敬：道路線形と運転挙動との関係に関する研究，東京大学学位論文，March，1993。
- 18) 越正毅，大口敬：高速道路サグにおける渋滞とその対策，道路，Vol.651，1995。

(1995. 1. 30 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN TRAFFIC CONGESTION PHENOMENA AND ROAD ALIGNMENTS AT SAG SECTIONS ON MOTORWAYS

Takashi OGUCHI

This paper deals with traffic congestion phenomena which are caused at sag sections on motorways by excessive traffic demand. The objective of this study is to identify the conditions which give rise to the traffic congestion phenomena at sag sections. This phenomena is dependent upon the drivers' behaviour which can be influenced by road alignments, road structures and traffic conditions and so on. Several factors which are effective to the occurrence of traffic congestion phenomena at sag sections are examined, and the quantitative conditions are identified. Finally the possible approaches to control the occurrence of the phenomena are discussed.