

車両の追従挙動とサグの隘路現象

尾崎 晴 男

①

車両の追従挙動とサグの隘路現象

尾崎 晴 男

目次

目次 図表一覧

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の構成	5
第2章 既往の知見の整理	7
2.1 渋滞の発生と道路の交通容量	7
2.2 高速道路単路部の隘路現象	10
2.3 自動車車両の追従走行モデル	15
第3章 サグの隘路現象	22
3.1 都市間高速道路におけるサグ渋滞	22
3.2 首都高速道路におけるサグ渋滞	27
第4章 車両走行データの収集と分析	31
4.1 試験車両によるデータ収集	31
4.1.1 試験走路における追従走行実験	31
4.1.2 中央高速道路における走行実験	33
4.2 交通流のビデオ観測によるデータ収集	35
4.2.1 首都高速道路における観測	35
4.2.2 東名高速道路における観測	36
4.3 追従走行挙動の分析	38
4.3.1 走行速度と車間距離との関係	38
4.3.2 相対速度と加速度との関係	41
第5章 追従走行モデルの提案	47
5.1 既往の追従走行モデルの吟味	47
5.1.1 相対速度への反応の特性	49
5.1.2 希望する車間距離からの偏差への反応の特性	51
5.2 提案モデル	53
5.2.1 その特徴と考え方	53
5.2.2 モデルの構造	54

5.3 追従走行モデルのパラメータ推定	56
5.3.1 推定の方法	56
5.3.2 推定の結果	57
第6章 サグの陥路現象の再現	63
6.1 縦断勾配の追従走行挙動へ影響	63
6.2 縦断勾配変化の影響の仮説と検証	64
6.2.1 影響のモデル化	64
6.2.2 サグ区間における検証シミュレーション	65
6.2.3 シミュレーションの結果	66
6.3 平坦路、クレストにおける比較シミュレーション ...	75
6.4 勾配変化の補償遅れ時間 T_g の評価	78
6.5 追従走行モデル各項の感度	79
第7章 結論と今後の課題	82
7.1 研究のまとめ	82
7.2 今後の課題	83

謝辞

参考文献

図表一覧

第1章

図1.1	中央高速道路名古屋方向下り線走行時の速度変化 (1993年5月1日).....	2
図1.2	東名高速道路名古屋方向下り線 秦野サグ地点の交通量と 平均速度(5分間集計値、1990年8月11日~14日).....	3

第2章

表2.1	隘路となるサグと渋滞継続中の交通容量.....	11
------	-------------------------	----

第3章

図3.1	秦野サグの縦断構造と観測断面位置.....	22
図3.2	2車線合計した1分間交通量の時間変動.....	23
図3.3(a)	秦野サグ上流47.5キロ地点の車線別交通量変動.....	24
図3.3(b)	秦野サグ付近46.6キロ地点の車線別交通量変動.....	24
図3.3(c)	秦野サグ下流45.9キロ地点の車線別交通量変動.....	25
図3.4	2車線平均した1分間平均速度の時間変動.....	25
図3.5(a)	追越車線の1分間平均速度の時間変動.....	26
図3.5(b)	走行車線の1分間平均速度の時間変動.....	26
図3.6	首都高速道路4号線下り線代々木サグの縦断構造と 観測断面位置.....	28
図3.7	首都高速道路4号線下り方向代々木サグの1分間交通量の 時間変動.....	28
図3.8	首都高速道路4号線下り方向代々木サグの 1分間平均速度の時間変動.....	28
図3.9	首都高速道路4号線都心方向代々木サグの縦断構造と 観測断面位置.....	29
図3.10	首都高速道路4号線都心方向代々木サグの1分間交通量の 時間変動.....	30
図3.11	首都高速道路4号線都心方向代々木サグの 1分間平均速度の時間変動.....	30

第4章

図4.1	追従走行実験の状況.....	32
図4.2	中野サグ(62kp)付近の走行位置と速度 (1993年5月1日).....	34
図4.3(a)	東名高速道路東京方向上り線 秦野サグ 渋滞安定後の時間-距離図(1990年7月29日).....	37
図4.3(b)	東名高速道路東京方向上り線 秦野サグ 渋滞発生時の時間-距離図(1991年7月28日).....	37
図4.4	追従走行実験による5人の運転者の 車間距離-走行速度関係.....	39
図4.5	中央高速道路走行時の車間距離-走行速度関係.....	40
図4.6	首都高速道路の車間距離-走行速度関係(定常走行時)...	40
図4.7(a)	大型車直後の追従車の減速開始時タイムラグ.....	43
図4.7(b)	大型車から2番目の追従車の減速開始時タイムラグ....	43
図4.8(a)	大型車直後の追従車の加速開始時タイムラグ.....	44
図4.8(b)	大型車から2番目の追従車の加速開始時タイムラグ....	44
図4.9(a)	反応感度のパラメータの相関分析結果 (大型車直後の追従車).....	45
図4.9(b)	反応感度のパラメータの相関分析結果 (大型車から2番目の追従車).....	45

第5章

表5.1	Xingによる追従走行モデルのパラメータ推定結果.....	48
図5.1(a)	相対速度モデルのシミュレーション結果 (反応感度 $\alpha=0.5$ 、加速と減速のケース).....	50
図5.1(b)	相対速度モデルのシミュレーション結果 (反応感度 $\alpha=1.0$ 、加速と減速のケース).....	50
図5.2	車間距離偏差モデルのシミュレーション結果 (加速と減速のケース).....	51
表5.2(a)	追従走行実験の5人の被験者のモデルパラメータ (昼間のケース).....	58
表5.2(b)	追従走行実験の5人の被験者のモデルパラメータ (夜間のケース).....	59
図5.3	シミュレーションによる5人の運転者の 車間距離-走行速度関係.....	61
図5.4	運転者Aの夜間走行のパラメータによる 昼間の先行車への追従走行結果.....	62

第6章

図6.1(a)	隘路現象シミュレーションの結果 (先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、 到達速度=90[km/hr])	68
図6.1(b)	隘路現象シミュレーションの結果 (先頭車の加速位置=600m、縦断曲線の中央部付近、 到達速度=90[km/hr])	69
図6.1(c)	隘路現象シミュレーションの結果 (先頭車の加速位置=1000m、縦断曲線の終点下流、 到達速度=90[km/hr])	70
図6.2(a)	隘路現象シミュレーションの結果 (先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、 到達速度=60[km/hr])	71
図6.2(b)	隘路現象シミュレーションの結果 (先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、 到達速度=90[km/hr])	72
図6.2(c)	隘路現象シミュレーションの結果 (先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、 到達速度=120[km/hr])	73
図6.3	500台目の追従車の速度変動プロファイル (先頭車の加速開始位置を変化させたケース)	74
図6.4	500台目の追従車の速度変動プロファイル (先頭車の加速後到達速度を変化させたケース)	74
図6.5	平坦路における比較シミュレーション	76
図6.6	クレストにおける比較シミュレーション	77
表6.1	サグの構造と縦断勾配変化への補償対応遅れの 交通容量への影響	78
図6.7	第2項を無効とした比較シミュレーション	80
図6.8	第3項を無効とした比較シミュレーション	81

第1章 序論

1.1 研究の背景

高速道路を時速100キロで走行する。自動車が快適な乗り物であることを実感するひとときである。それなのに突然、前方に行く手を阻む赤いテールランプの列に遭遇し、これがいつ終わるとも知れないように延々と続く。渋滞につかまってしまった経験は誰しもあることだろう。

道路交通における渋滞の原因にはさまざまなものがある。確かに交通需要が多すぎるといことは理由のひとつである。しかし多くの場合、渋滞の先頭には交差点運用の不備、駐車車両や道路工事、さらには交通事故等による車線の閉塞など、目に見えて通りにくいと解るものが存在しているものである。このように原因が明解な場合、治療方法を見つけることは比較的しやすい。実現の難易はともかく、このような障害を取り除くべく、処方箋を書いてやれば良いからである。

ところが高速道路でほぼ休日毎に生じ、行楽客を悩ませている渋滞はこれと様相を異にする。見かけ上は単なる一本道にすぎないはずの、ある特定の地点やトンネルを先頭にした渋滞が日本中の各所でみられるのである。これらの渋滞は、特段の原因がドライバーにも、また実のところ交通技術者にもはっきりと見受けられないのである。

著者は昨年のゴールデンウィーク期間中の5月1日(土)、東京から山梨県の大月市に向かって中央高速道路に乗った。東京から大月まで約70km、本来ならば1時間もかからない道のりにすぎない。ところがである、とにかく渋滞のしどおしだったのである。

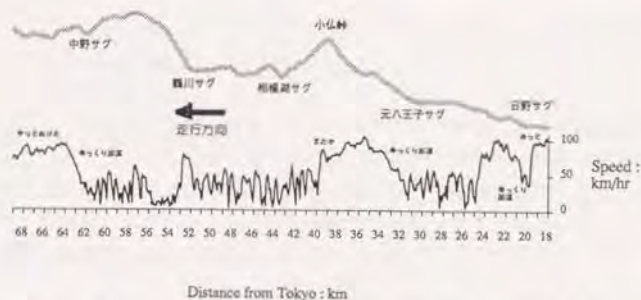


図1.1 中央高速道路名古屋方向下り線走行時の速度変化(1993年5月1日)

図1.1は東京からの距離を横軸に取っており、右端は東京から18キロ地点の府中あたりから始まっている。図中の下の方に描かれた濃い線はその地点で時速何キロで走行していたかを示す。左の山梨県方面へたどって行ってみよう。悲しいかな、50kmの区間で4回も渋滞に遭遇している。それぞれ20キロ地点、25キロ地点、40キロ地点、53キロ地点である。第1回は比較的軽度の速度低下ですんだが、その後の3回はそれぞれ延々と10km近くも渋滞に巻き込まれている。

渋滞の先頭はいったいどうなっていたのであろうか？車線数が減少しているわけでも、他の路線との合流地点でもない。渋滞の中を走ってゆくにつれて、何が原因か解らないうちにいつの間にか通り過ぎてしまっていた、というのが実感である。

図の上方に描かれた薄い線はその地点のおおよその標高の変化に相当する。高き方向に若干誇張してあるので、傾きは図で示されるほどにはきついものではないが、中央高速道路は山岳部を通ることもあって、アップダウンの多いコースを取っていることがわかるであろう。4箇所の渋滞の先頭付近に注目すると、勾配の変化が「峠」とは逆のすりばち状をなしていることが見受けられる。このような道路構造を「サグ(sag)」という。これらサグ地点は単なる一本道であるのにも関わらず渋滞を生じる隘路となってしまうのである。これはいったいなぜなのであろうか？

また、サグが渋滞の先頭になるらしいことを認めるとしても、サグとなっている地点はこれら4箇所以外にもある。それなのになぜこれら4箇所を先頭に渋滞が生じ、他のサグでは生じなかったのか？、という疑問もわいてくる。

図1.1の中には注目に値することがもう2点ある。まず第1点は、渋滞の中ではくまなくずっとのろのろとした走行を続けているわけではなく、時速60キロ程度まで速度が上がったかと思えば、停止したり、という走行を繰り返していることである。もうひとつは、渋滞の先頭付近における時速約30キロの低速走行から時速90～100キロ程度まで速度を回復するのに相当長い距離がかかっていることである。4回とも速度回復に2～3キロもかかっていることが読み取れるであろう。これら2点につ

いても、どこのサグ渋滞においても見られることである。渋滞した交通流は不思議な特性を有しているのである。

現在、中央高速道路を含め、日本の各地の高速道路で特定のサグを隘路とする渋滞が行楽シーズンには毎日のように生じている。これまでの我々の経験からは、需要交通量が増加してくると渋滞がサグ地点で発生し、一旦渋滞が発生するとサグを通過できる交通量が大きく低下してしまう。このため、需要交通量が減少して渋滞列が解消するまでサグ地点が渋滞の先頭にとどまるのである。

しかし、隘路となるサグはいつも通りにくいわけではない。図1.2は東名高速道路名古屋方向下り線の神奈川県秦野サグ地点（2車線部）における、通過交通量と平均通過速度の時間変動を4日間連続で示したものである。この4日間は1990年の8月11日から14日までのお盆休暇の前半にあたり、行楽や帰省に首都圏から西に向かう車両が集中した期間である。データは秦野サグ地点に設置された車両感知器によって計測された5分間毎の集計値であり、日本道路公団に提供していただいた。図中の濃い線が通過交通量、薄い線が平均通過速度の変化をあらわす。交通量は5分間集計値を12倍して、1時間値に換算してある。規模の大小はあるが、4日も渋滞が発生したことが、薄い線の示す平均通過速度が極端に低下している時間帯からわかるであろう。

濃い線があらわす通過交通量に着目すると、低速となっている渋滞中よりも高速走行をしている非渋滞時に高い交通量が実現している。これは、渋滞が発生する直前の需要交通量の上昇期間に顕著に見られる。このように渋滞の開始直前と渋滞中の交通量を比較すると、一旦渋滞してしまうと直前まで通過可能であった交通量より低い台数しか通り抜けられないことが解る。渋滞することによって、サグ地点の疎通能力が低くなってしまうのである。

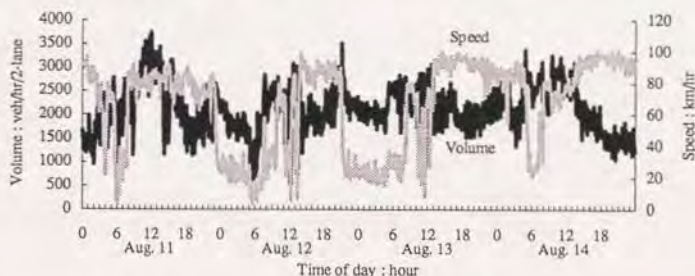


図1.2 東名高速道路名古屋方向下り線 秦野サグ地点の交通量と平均速度
(5分間集計値、1990年8月11日～14日)

ではいったいどうしたらこのような渋滞を軽減できるのでしょうか？皆が旅行に行くとき出かけるドライバーが悪いのか。確かにそれもある。現に日本道路公団からゴールデンウィークや盆暮の1カ月前ほどに出される渋滞予報は、近年幸いにして良い方に外れる傾向にある。自動車を利用する時間帯や日を、あるいは交通手段そのものをドライバーが自主的に変更する需要管理の効果である。するとやはり需要が多すぎることが渋滞の原因なのか。いやそれだけが原因と傍観できない事態が生じているのである。

道路の計画に当たっては、交通需要量を予測した上で計画交通量を設定し、これに応じた適切な道路構造の設計がなされる。したがって、計画交通量は、とどろりなく交通を処理できるはずのものである。すなわち需要に見合った疎通能力が一気通貫で確保されていなければならない。

ところがである。単なる一本道であるのに実際に現れた渋滞の先頭地点では、これより上流の地点よりも通りにくいことが判明しているのである。サグは通りにくいところなのか？こんなはずではなかった。計画のベースとなる道路の疎通能力に関して、サグの低い能力は交通技術者が予想していなかったことなのである。

1980年頃からこのような渋滞の名所はある特定のサグや長大トンネルであることが認識されてきた。しかし、一本道の途中に位置するこのような箇所が隘路になるとは、誰も予想していなかったのである。道路交通の調査研究が最も進み、現在もなお世界で道路の設計と運用のマニュアルの手本となっている米国 Highway Capacity Manual (HCM)¹⁾にはそのようなことはまったく記載されていない。残念ながらわが国の道路構造令²⁾にも見られない。唯一1984年に発行された「道路の交通容量」³⁾に参考資料として長大トンネルやサグの最大通過交通量の観測データが記されているだけなのである。

1.2 研究の構成

本研究の目的は高速道路のサグにおける陥路現象を理解し、これが生ずる原因を解明することにある。先に記したように、高速道路で現に陥路となっている地点としては、サグのほかに長大トンネルがある。トンネルは暗い、狭い、といったもう一つ複雑な走行環境が影響しているはずである。そこで本研究では高速道路の陥路現象を解明する第1歩として、対象をサグにしぼっている。

サグにおける陥路現象は、サグという道路構造における自動車運転者の自然な走行挙動の集積として生じると考えられる。しかしながら、現状ではどのような道路構造ならば陥路現象を回避または軽減できるか、という知見を我々は持ち合わせていない。このようなことから本書では二つのトピックに分けて論を進めていくことにする。

ひとつは、自動車運転者の自然な追従走行挙動を把握し、これをモデル化することである。これまでも、また現在においても交通流の研究には幾多の事例がある。しかしこれらの研究で実用上有用なものの多くは流体とのアナロジーで捉えたものである。すなわち流量、流速、密度といった、流れを巨視的に見たときの量とこれら相互の関係を対象とした研究である。流体論の言葉を借りれば、分子論レベルに相当する議論は数えるほどしか存在しない。そして、1台1台の車両の走行挙動を分析し、これを再現してなおかつ数キロメートルにわたる長い区間を対象とした実用的なモデルは依然として未開拓の分野となっている。

もうひとつは、現在までのところその原因が解明されていない高速道路のサグ地点の陥路現象についてその原因の仮説を提示し、開発した追従走行モデルを利用しながら、この仮説を検証することにある。これにより、陥路となりにくいサグを設計してゆく上で今後の指針となる知見を見いだそうとするわけである。

現在供用されている道路を最大限利用するためには、現状で陥路となるサグをどのように改良したらよいか。また今後建設する高速道路においてこのような陥路の発生を極力抑えるためにはどのような設計をすべきなのか。本研究は1980年代からなされてきたこの問題に対する交通技術者からの回答のひとつに位置づけられる。

本書の構成は次のようである。

第2章では、本研究の背景となる項目に関する既往の研究をレビューする。関連項目として、道路の交通容量、高速道路単路部の陥路現象、車両の追従走行モデルの3つのトピックを取り上げる。ここで現在わかっていることと、そうでないことを整理し、本研究で明らかにしようとする事項を浮き彫りにする。

第3章では、交通流を理解する第1歩となる路側からの観測によるデータをもとに、サグを原因とする隘路現象の特徴を詳細に分析する。そして、路側からの交通量や通過速度の観測だけで隘路現象の原因に迫るには、限界のあることを示す。

第4章では、交通流を構成する自動車車両の走行データの収集と分析について述べる。収集した交通流データは、追従走行実験による特定の運転者の走行挙動と、実際の交通流を高所からビデオ撮影し、この映像から画像処理によって得た不特定多数の運転者の走行挙動である。これらのデータについて、その収集の方法、解析、実験と実交通とのデータと比較した議論を展開する。

第5章では、実用的な追従走行モデルの有すべき特徴について議論を深め、具体的なモデル構造を提起する。そして、第4章で収集した車両の走行データをもとに、提案した追従走行モデルのパラメータを推定する。

第6章では、サグという道路構造が自動車運転者の追従走行挙動にいかなる効果をもたらすかについて仮説を提示する。そして、第5章で提案された追従走行モデルをもとに、サグにおける交通流シミュレーションを行い、仮説を検証すると共に隘路現象の再現性について考察する。

第7章は本研究の結論と今後の課題について述べることにする。

第2章 既往の知見の整理

この章では、本研究に関連する3つの事項、すなわち道路の交通容量、高速道路単路部の隘路現象の特徴、車両の追従走行挙動モデル、について、既往の調査研究によって解っていることと、まだ解っていないことを整理し、研究の方向を浮き彫りにする。

2.1 渋滞の発生と道路の交通容量

交通渋滞とは

まず、交通渋滞がどのような理由で発生するか、確認しておくことにしよう。交通渋滞は、ある道路断面を通過しようとする単位時間当りの交通需要量が、その道路断面を通過し得る単位時間当りの可能量を超過するときに発生する。この超過分は通りにくい道路断面の上流側に溜ってくることになる。この溜りが我々が実際に体験する渋滞した交通流である。

このように、渋滞問題とは基本的に需要量と需要に対するサービス量のアンバランスの問題と言い換えることができる。したがって、交通需要量を推定し、これに応じた道路のサービス量を提供する道路計画者の立場から考えると、このアンバランスの問題は2種類の意味を持つ。ひとつは、用意するサービス量を見積る上で想定していた需要量よりも、実際の需要量が上回ってしまった場合である。これは、需要量の推定の失敗と指摘されるものである。もうひとつは、需要量に応じて用意していたはずのサービス量が、想定していたサービス能力を達成していない場合である。こちらの場合は、道路交通そのものの特性に関する知識不足として評価される問題である。本研究が扱おうとしているのは、後者の問題、すなわち道路交通工学の知見不足に関わることなのである。

道路の交通容量²⁾

道路のサービス能力について、話を一本の道路に絞って考えてみよう。道路の路線の中にその前後の区間に比較して通りにくい地点、すなわち隘路が存在すれば、その隘路地点の通過可能量以上は通過し得ないわけであるから、これが路線全体のパフォーマンスを決定してしまう。したがって、道路を設計する上では、想定された交通需要量に対応して、路線一貫して均等なサービス能力、すなわち通過可能量を確保する必要がある。この通過可能量を道路の交通容量と呼んでいる。

現在、わが国の道路の設計においては、先進例の米国に習い、「基本交通容量」、「可能交通容量」という2種類の交通容量の概念を用いている。

「基本交通容量」とは、道路条件及び交通条件の全てにおいて理想的な状態における交通容量であると定義されている。これは、道路の断面を通常1時間に通過し得る乗用車の台数（PCU：Passenger Car Unit）で表現される。1方向多車線道路においては、1時間、1車線当り乗用車の台数として、2200 [pcu/hr/lane] 程度の値をとるものとされている。

一方、「可能交通容量」とは、現実の道路の道路条件と交通条件のもとで通過することが期待できる乗用車の最大数である。これも、通常1車線当り1時間に通過し得る乗用車の台数で表現されている。実際のさまざまな道路・交通条件において観測されたデータを分析し、道路の計画段階で「可能交通容量」を帰納的に推定する方法が提案されている。これは、「基本交通容量」に、対象とする道路の現実の道路条件と交通条件の影響による補正を行って求める方法である。具体的には、「基本交通容量」に、実際の各影響要因による補正率を独立に乗じることによって推定するのである。現行の規定では、「可能交通容量」の算出において定量的に考慮される影響要因には次のようなものがある。

車線幅員：米国における道路交通運用の経験によれば、交通容量の面から必要かつ十分と考えられる車線の幅員は12フィート（約3.5m）であるとされている。一方わが国では、観測される最大通過交通量は車線幅員が3.25mの都市内高速道路で多く得られているという現実がある。そこで車線幅員が3.25m未満の場合補正することになっている。

側方余裕：側方余裕とは、車道端から路側又は分離帯にある、ガードレール、道路標識、樹木、擁壁などの障害物までの距離のことである。米国における経験によれば、交通容量の面から必要かつ十分と考えられる側方余裕は6フィート（約1.75m）であるとされている。しかしこれについてもわが国では、観測される最大通過交通量は側方余裕が0.75mの都市内高速道路で多く得られているという現実がある。そこで側方余裕が0.75m未満の場合に補正することになっている。

沿道状況：これは沿道からの車両の流入や、歩行者や自転車の飛び出すおそれといった沿道利用に起因する潜在的な干渉による交通容量への影響である。しかし高速道路のような出入の制限された道路においては、考慮する必要がない。

縦断勾配：勾配区間の交通容量への影響については、

1) 勾配区間の存在によって視距の制約を受け、安全な追越行動の機会が少なくなること。

2) 車両の制動距離が平坦路と異なるために、安全な最小車頭間隔が平坦地とは異なってくること。

3) 車両は上り勾配区間が長く急であれば平坦地よりも速度が低下すること。

などから、かなりの影響があると考えられている。規定では、このような勾配区間の影響は、特に大型車に対して大きく現れるので、定量的な影響の程度は大型車についてのみ考慮し、次にあげる大型車による影響に含めるものとされている。

大型車：交通容量は各車両が走行時に保つ車頭距離と速度で決まり、車頭距離は車間距離と車両長の和であることから車両の長さが交通容量に影響を与える。大型車は車両長が乗用車に比較して大きいために、大型車が1台存在することによって乗用車数台分の面積を占有する。したがって、乗用車のみで構成される交通に比較して、大型車が混入することで交通容量は低下することになる。

大型車の混入による影響を定量的に評価する際、大型車の混入率と大型車1台が何台の乗用車に相当するか、という大型車の乗用車換算係数（PCE：Passenger Car Equivalence）が使われている。現行の規定では、交通容量を推定する際に使用される乗用車換算係数の値は1.7～4.6程度の範囲で、上り勾配の大きさ、勾配区間の長さおよび大型車混入率に応じて定められており、この換算値を用いて上り勾配の影響を考慮することになっている。

以上のように、現行の規定で高速道路の単路部の可能交通容量を推定するに当たって考慮されるのは、事実上車線幅員、側方余裕、大型車の混入率+縦断勾配+勾配長ということになる。したがって、これら3種類の影響要因に関して同一条件で設計された高速道路の単路部では、設計上は特定の箇所が極端に交通容量の低い隘路となることは、想定されていないのである。ところが、現実に見られるように全国各地の高速道路で特定のサグ地点が、とりわけ需要交通量で乗用車が構成する割合の高い行楽・帰省シーズンを中心に極端に交通容量の低い隘路となっているのである。すなわち、道路交通工学の既往の知見からは想定していなかった事実が現場で起きていることが問題なのである。

2.2 高速道路単路部の隘路現象

隘路現象の特徴

ふりかえって見るに、縦断勾配が増加に転じるサグ地点が単路部でありながら交通容量上の隘路となり得るらしい、との事実の報告は、1950年代にアメリカでなされていた⁴⁴⁾。これはニューヨークのマッドソン川をはさんだ対岸のニュージャージーを結ぶ海底トンネルである、リンカーントンネル及びホランドトンネルの内部で問題となった渋滞現象である。これらの海底トンネルは長さが約2 kmであり、片方向2車線であるが、各車線幅は3mとやや狭い。トンネル内部では車線変更が禁止されており、事実上それぞれ1車線道路として運用されていた。

渋滞発生時には、2車線合計の交通容量は2000[veh/hr/2-lane]にも満たなかったという。トンネルを管理する New York Port Authority によるトンネル内部の走行速度調査によれば、隘路地点は上り勾配の始まるサグ地点であると報告されている。しかし、当時アメリカではこれらトンネル内のサグ以外には似たような隘路事例は報告されておらず、トンネルという道路条件から閉鎖された空間であることと、視距が不良であることが複合した原因と見なされるに終わっている。

その後アメリカの海底トンネルにおける隘路現象に類似した事例が問題となったのは、日本であった。わが国では、1953年の名神高速道路の一部開通を皮切りに次々と都市間を結ぶ幹線高速道路の供用延長が拡大されてきた。これとともに高速道路の走行台数は年々着実に上昇を続けている。また、近年は生活様式の変化や週休2日制の広がりから特に休日の行楽交通の増加がめざましい。これに伴うように都市間をつなぐ高速道路の長大トンネルや、サグにおける隘路現象が1980年頃から顕著に現れてきたのである。一見なんの変哲もないトンネルやサグであるにも関わらず、交通量が多くなるとこれが容量上の隘路となって渋滞が発生し、需要が充分に低下するまで長時間渋滞の先頭となってしまうのである。

わが国における交通流と隘路現象の調査研究には越らによる一連のものがある^{45)~48)}。この中でサグや長大トンネルが交通容量上の隘路となることと、この隘路現象には箇所によらず共通した特徴があることが指摘されている。

特徴のひとつは、需要交通量が短期間に集中しやすいゴールデンウィーク、旧盆、年末年始といった時期には必ずといって良いほど発生することである。渋滞が需要交通量と道路の交通容量とのアンバランスを原因とすることを考えれば、これはもっともなことであろう。週休二日制が広まってきた近年では、行楽シーズンの休日前後において天候が良好な日には、まずまちがいなくどこかのサグで渋滞が発生するまでになっている。

もうひとつは、渋滞発生時のプロセスである。観察によれば、交通量が増加してくると渋滞はまず追越車線から発生する。続いて追越車線の渋滞列を避けようとする車両群が走行車線に車線変更するために、今度は走行車線においても需要が急増することによって結局全車線で渋滞する、というパターンを取ると言われている。

一旦渋滞が発生した後、隘路地点がサグやトンネルに停留し、これを先頭にした渋滞が延々と続くことも共通点である。また、渋滞継続中には隘路を通過できる交通量はほぼ一定の水準を保つのであるが、この可能通過交通量である交通容量が極端に低いこともこれら隘路に共通の特徴である。

また隘路下流に目を転じると、隘路からの速度回復が非常に緩やかで、高速道路で期待される時速80～100キロまで回復するのに1～3キロもかかることが、特徴として挙げられている。

表2.1は、東京近郊のサグの渋滞後の交通容量の観測値である。縦断勾配とその変化の構成はそれぞれ異なるが、どの地点もさほどの差がなく、2車線合計で1時間当たり2400～2800[veh/hr/2-lane]程度となっている。

都市間高速道路のようなわが国の道路構造令という第1種の道路では、前節で述べたように可能交通容量として1車線当り2200[veh/hr/lane]程度を期待しているはずである。したがって実際に隘路となるサグにおいて渋滞継続中に観測される交通容量はこれに比較してはるかに低いものである。

表2.1 隘路となるサグと渋滞継続中の交通容量¹⁷⁾¹⁸⁾

	サグ地点	縦断勾配変化 (%)	渋滞後の交通容量 [veh/hr/2-lane]
中央高速道路			
東京方面	相模湖	-3.5 → +4.5	2600～2800
	中野	-3.2 → +3.7	2400～2700
名古屋方面	元八王子	+1.0 → +2.7	2500～2700
	鶴川	-0.3 → +5.0	2500～2700
	中野	-3.7 → +3.2	2400～2700
東名高速道路			
東京方面	中井	-3.4 → +4.8	2500～2700
	秦野	-2.6 → -0.3	2500～2800
	伊勢原	-0.3 → +1.4	2500～2700
名古屋方面	秦野	+0.3 → +2.6	2500～2700

隘路になるサグ、ならないサグ

わが国のように山岳地域が広く分布している国土において都市間を結ぶ高速道路を設置する場合、縦断勾配を数多くの地点で変化させることは避けることはできない。したがって高速道路の路線上にはいくつかのサグが存在することになる。ところがこれまでの経験では、実際に隘路となるサグは不思議なことに特定の箇所である。これはいったい何故であろうか。

この疑問に答えようとしたのが岩佐らの研究である¹⁰⁰⁾。この研究は東名高速道路に注目し、日本道路公団において交通管理用に日々作成されている渋滞記録をもとに、隘路となりやすいサグとそうでないサグとに分類し、これらサグの相違に関して定性的な比較分析を実施した。

分析の結果、隘路となりやすいサグにおいては、交通需要そのものが大きくならないという要因のほかに、運転者にとってサグ付近の前方の見通しが良好であること、サグの直上流に平面曲線半径の小さなカーブが存在すること、比較的近接した上流に隘路となるサグやトンネルが存在すること、などの特徴があることを見いだしている。

この問題をさらに追究したものが大口の研究である¹⁰¹⁾。この研究では、隘路現象発生のかきかけとなる車群内部の速度低下が道路線形を原因とするものと考え、隘路となりやすいサグとそうでないサグの道路線形上の相違について定量的な分析が試みられている。

分析の結果、隘路となりやすいサグとは、自動車運転者による縦断勾配が増加する変化の把握が困難な線形のサグである、との仮説を提示している。高速道路の線形設計上、サグのような勾配変化区間には縦断勾配の急激な変化を緩和する縦断曲線が適用されている。線形設計において、視覚的に滑らかな曲線を求めるあまり、縦断勾配の変化が十分に自動車運転者に認識されないことが、渋滞発生の引金となる速度低下の一因である、と考えているわけである。

仮説を支持する事例として、縦断勾配の変化が誰の目にも認識できるようなサグでは隘路現象が発生していない事実や、縦断勾配の変化区間付近に遮音壁を設置後、道路線形の認識が困難になったサグにおいて渋滞の発生頻度が増加したことなどが挙げられている。

以上の研究結果を総合すると、縦断勾配が増加するというサグの線形が運転者に認識されうるか、換言すれば、サグにおいて縦断勾配が増加方向に変化してゆくことに応じたアクセル調節を運転者が積極的になしうるか、が隘路となるか否かを決定するものと考えられる。すなわち、運転者が縦断勾配の変化に気づかず、平坦な

道路におけると同様の自然な走行を行うようなサグは隘路となりやすいと考えて良さそうである。

渋滞中の低い交通容量

走行速度低下をきっかけとする渋滞が生じた後、隘路となったサグの低い交通容量を対象としたものとしては、秀による研究¹⁰⁾が挙げられよう。この研究では、東名高速道路において発生した多数の隘路現象のデータを分析することにより、渋滞発生後、サグを隘路とした渋滞列が延進するにつれて隘路の交通容量が低下することを見いだしている。渋滞列の延進長を表す量として、車両が渋滞に遭遇し、渋滞区間を走行した後先頭まで達してサグ地点を通過するまでに渋滞に巻き込まれていた走行時間を取り上げている。この「渋滞に巻き込まれた時間」を東名高速道路に約2 kmおきに設置されている車両感知器の通過交通量と地点速度のデータを利用して推定し、この時間が大きくなるにつれて隘路の交通容量が低下することを示しているのである。

また、渋滞が最初に発生した時から安定した交通容量まで低下するのに若干の時間を要するが、渋滞に巻き込まれた時間が10分程度に達する車両が隘路を通過する頃から安定した渋滞になっているという。すなわち渋滞発生直前の最大通過交通量から渋滞発生後の安定した通過交通量の二つの交通容量値を遷移する時間は、渋滞に巻き込まれた時間に依存するらしいことを見いだしているわけである。

渋滞中の隘路の交通容量は明るさ環境に影響されることも報告されている^{10,11)}。ゴールデンウィークや盆暮れといった長期にわたる休暇期間においては、その初日にとりわけ交通需要が集中することになり、前日の夜間に渋滞が発生し、翌日の昼まで継続することがしばしば見られる。このような夜間から継続する激しい渋滞の場合、夜明けごろに隘路の交通容量が顕著に増大する事実が観測されているのである。

これに関連して、逆に昼間に発生し、夜間まで継続するトンネルを隘路とする渋滞では、日没後に隘路の交通容量が増大する事例が報告されている。これは夜間にはトンネル内部が相対的にトンネル外よりも明るくなるためと考えられる。

このように渋滞継続中の隘路の交通容量は、運転者が前の車に追従して走行する意欲というか、心理的な面にも大きく左右されることが言えるであろう。

渋滞先頭からの速度回復

サグの隘路現象のひとつの特徴として、渋滞の先頭からの加速がごく弱く、

30[km/hr]程度の低速から高速道路で期待される高い速度まで回復し、自動車運転者が渋滞から脱出したと認識するまでに1~3 km程度かかってしまうことを前節で述べた。これと類似した渋滞列からの弱い加速現象は、カナダの高速道路における交通流でも最近報告されている。

Persaudら²⁴はトロント市内のフリーウェイにおける合流部を隘路とする渋滞流を調査したところ、隘路からの加速が非常に低いことを見いだしている。対象としたのは1方向3車線の本線にオンランプから1車線が合流して部分的に4車線になった後、1車線が減少するボトルネック地点である。なお、この区間の縦断線形は平坦である。渋滞後の交通容量は、1車線平均1700[veh/hr/lane]程度であり、合流点付近の平均速度40[km/hr]から70[km/hr]程度まで加速するのに約700mを要している。このように極端に低い加速度で長い距離を要する速度回復特性について、彼らは'surprising thing'とコメントしているものの、その原因については検討に手を付けるまでには至らなかった。

以上高速道路の単路部における隘路現象に関する既往の知識をまとめてみると、隘路現象が発生する箇所の特定、発生の定性的なプロセス、渋滞継続中の交通現象について多くの調査研究が成されてきたといえるだろう。しかしその発生原因そのものを突き止めるまでにいたっていないのが現状である。

また、設計面からの要請として、どのようなサグならば渋滞を起こさずにすむか、あるいは道路管理、交通管理の実務面からどのような対策を施せば、現在の渋滞を緩和できるのか、といった問題に満足に回答できる知識を持ち合わせてもいないのである。

既往の研究例を考察してみるに、サグを原因とする渋滞のきっかけや渋滞の先頭が停留する原因は、サグという道路構造が運転者の操作にもたらす外的な影響にあるように考えられる。一方、渋滞列からのごく弱い加速に関しては、車両の自然な追従挙動に起因しているのではないかと考える方が自然のようである。

このように考えると、隘路現象を支配しているのは、道路構造とこれを利用する自動車運転者の運転挙動とのミスマッチにあると考えられる。次節はこの立場から、隘路現象の発生メカニズムと渋滞走行を支配するであろう追従走行挙動に関する既往の研究を概観する。

2.3 自動車車両の追従走行モデル

2.3.1 GMモデル

自動車交通流を個々の車両の走行挙動の集積として取り扱おうとする考え方は、1950年代にその端緒を見ることができる。Reutchel、Pipesらは、相違なって走行する2台の車両を考えたとき、追従車が先行車に対応して取る走行状況とは、車頭距離が走行速度に線形な関係であると考えた²⁰。すなわち、

$$X_L - X_F = L + k \cdot V_F \quad (2.1)$$

ここに、

X_L : 先行車の道路走行方向の車頭位置

X_F : 追従車の道路走行方向の車頭位置

V_F : 追従車の道路走行方向の速度

L : 停止時の車頭距離

k : 比例定数

である。

このような車頭距離—走行速度の関係を仮定すると、両辺の時間微分を取ることにより、次の関係が得られる。

$$\dot{V}_F = \frac{V_L - V_F}{k} \quad (2.2)$$

ここに、

V_L : 先行車の道路走行方向の速度

である。

これは、追従車の加速度が2台の車両の相対速度に比例することを意味している。

以上の関係を基にした車両の追従走行挙動の研究として、前節で述べたリンカーントンネルやホランドトンネルにおける渋滞に触発された New York Port Authority とゼネラルモーターズ社の研究所における一連の研究²⁰⁻²²が著名である。

これらの研究で追従走行挙動の仮説として提唱されたのは、追従走行する車両の運転者が自車と前方車との間わり合いにおいて速度を調節すべきなんらかの刺激を受けた時、若干のタイムラグをもってそれに反応する、という運転行動である。こ

の刺激として、前方車と追従車との速度差である相対速度、追従車の反応として、加速度を取り上げている。すなわち、

$$\dot{V}_F(t+T) = \alpha \cdot [V_L(t) - V_F(t)] \quad (2.3)$$

ここに

$V_F(t)$:時刻 t における追従車の加速度

$V_L(t)$:時刻 t における前方車の速度

$V_F(t)$:時刻 t における追従車の速度

T :相対速度に対する反応加速度のタイムラグ

α :反応感度

である。

式(2.3)の右辺にある、 $V_L(t) - V_F(t)$ は時刻 t における相対速度である。したがって式(2.3)は、 $V_L(t) > V_F(t)$ 、すなわち前方車の方が速度が大きく車間距離が広がりつつあればタイムラグ T をもって加速し、逆に $V_L(t) < V_F(t)$ ならばこれもタイムラグ T で減速するという直感的にも理解できる追従運転者の操作を表現したものである。

走行実験データの分析によって、相対速度と加速度とは、 $T=1$ 秒前後のタイムラグをもって有為な相関があることが見いだされた。そこで次には反応感度 α としてさまざまな関数形が検討された。

Gazisら²⁰は反応感度とは走行速度が高いほど大きく、また車間距離が狭いほど大きいとした追従走行モデル式(2.4)を提唱した。これが現在交通工学の教科書で見られる追従走行モデルの定番であり、GMモデルの名で知られている。

$$\dot{V}_F(t+T) = \alpha \cdot \frac{[V_F(t)]^m}{[X_L(t) - X_F(t)]^l} \cdot [V_L(t) - V_F(t)] \quad (2.4)$$

$X_L(t)$:時刻 t における前方車の位置

$X_F(t)$:時刻 t における追従車の位置

l, m :パラメータ

しかし、この式をもってしても現実の交通流を記述するタイムラグと反応感度のパラメータの適切な組合せを特定するまでには至らなかったのである。

また彼らはさらに前方の車両の効果についても言及している。しかしながら3台の車両の追従実験を実施して得られたことは、直前車の影響とさらに前方の車両の

影響とを区別することが非常に難しいという事実であった。

GMモデルを支持する知見

式(2.4)に示されたGMモデルを支持する知見として、これを別の角度から眺めた結果が著名である。これは、1台1台の車両の動きをミクロに記述する追従走行モデルと、道路交通流を構成する多数の車両を集計したマクロ状態量である、交通量と平均速度、車両存在密度との関係である。GMモデルをもとにこれの定常状態を想定し、タイムラグ T を無視して時間に関して積分すると、適当な境界条件のもとでは、よく知られた交通量と交通密度との関係が導き出されたのである。これは、Reutchel、Pipesらが車頭距離-走行速度の関係を微分して相対速度-加速度の関係を導いたのと逆の演算を施したことに相当するわけである。

Gazisらは、式(2.4)の追従走行モデルから、当時Greenburgらが路側から観測される交通量と平均速度のデータから別に提案していた、車両群を集団として取り扱う巨視的な交通流モデルを導くことができることを示した。さらにMay²⁰⁾は、巨視的に見た交通流の諸量の関係を最もよく説明するパラメータから逆に式(2.4)の追従走行モデルのパラメータ l, m の組合せを推定しようとした。類似した検討は、Cederらによってもなされている²¹⁾⁻²⁶⁾。しかしその結果においてもまた、パラメータ l, m の特定の組合せは見いだされず、ある範囲ならば、どの組合せもそこそこの説明力を持つ得ることが解っただけであった。

GMモデルは加速と減速とで形式が変わることを前提としていないが、反応感度については、加速時と減速時とは加速時の方が鈍いのではないか、という研究結果も得られている。Treiterer²⁷⁾はオハイオ州コロンバスのフリーウェイにおいて航空写真で観測した交通流データを基に、減速と加速を経験した車群の挙動を検討し、GMモデルのパラメータを加速状況と減速状況とに分けて推定している。これによれば、GMモデルにおいてもパラメータは加速減速の状況によって変化することがわかる。

GMモデルの欠点

ゼネラルモーターズのグループによって提案された追従走行モデルは、最も簡潔な入力情報で速度調節を行う相対速度と加速度という第1次近似として高く評価されるべきであろう。しかしながら相対速度のみのモデルにはいくつかの問題点が残った。ひとつは、モデルの構造上、シミュレーションによって車両走行の再現を行う場合、相対速度がゼロならば追従車が加速減速を行う要因がなく、再現結果が初

期条件に依存する点である。追従走行モデルはこれを積分することによって交通流の巨視的關係が導かれたわけであるが、これも境界条件次第であった。もうひとつは高い交通量の状態で状況を再現しようとする、容易に衝突を起こしてしまう点である。

2.3.2 追従モデルの実用化研究

GMモデルの改良

GMモデルの全盛期における追従挙動の研究は、追従走行モデルをもとに実際の交通流を模擬することを目的とするよりも、簡単なモデル化によってどの程度交通流の特徴が理解できるかという試み^{28)~31)}と、交通流の安定性を数学的に検討すること^{32)~40)}をその本流とすることにとどまっていた。しかし計算機能力の飛躍的な向上、交通計画・交通管理の高度化の要請等があいまって、1台1台の車両の走行挙動を記述することにより、その集積として実際の交通流を再現できるモデルを実用化しようとする試みが最近見られるようになった。これらの研究では、自動車運転者の受ける刺激、すなわちモデルの入力情報をさらに広く捉え、多数の入力情報から出力操作を記述しようとするところに特徴がある。

森、越ら²⁴⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽³¹⁾はGMモデルに代表される古典的な追従走行モデルに改良を加え、より現実の追従挙動を記述し、これによりサグやトンネルの陥路現象を再現することを意図した追従モデルを提案した。

このモデルは、追従車の加速度行動を記述するGMモデルに速度に応じた目標車間距離に接近しようとする要因を取り込んだものである。さらに道路状況に応じた希望速度に接近しようとする要因が存在するという仮説も提唱されている。

$$\begin{aligned} \dot{V}_F(t) = & \alpha \cdot \frac{1}{[S(t-T_1)]^L} \cdot [V_L(t-T_1) - V_F(t-T_1)] \\ & + \beta \cdot \frac{1}{S(t-T_2)^m} \cdot [S(t-T_2) \cdot f(V_F(t-T_2))] \\ & - \gamma \cdot \theta \\ & + \lambda [V_{exp} - V_F(t-T_3)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここに

$V_L(t)$:時刻 t における前方車の速度

$V_F(t)$:時刻 t における追従車の速度

$S(t)$:時刻 t における追従車の前方車との車間距離

$f(V_F)$: 追従車の速度が V_F の時の希望車間距離の関数

β : 縦断勾配の変化量

V_{exp} : 追従車の希望走行速度

T_1 : 相対速度への加減速反応タイムラグ

T_2 : 目標車間距離からの偏差への加減速反応タイムラグ

T_3 : 希望速度からの偏差への加減速反応タイムラグ

$l, m, \alpha, \beta, \gamma, \lambda$: パラメータ

である。

この追従挙動の仮説を検証しようとした試みとして、Xingの研究⁴⁴⁾があげられる。この研究では、自由流中の走行時と渋滞流中の走行時との2種類の走行データを実験車両で観測し、これら観測データをもとに追従走行モデル(2.5)のパラメータの推定を行っている。推定されたパラメータは、自由流と渋滞流とは、かなり異なった値となっている。運転者の行動を記述するパラメータはこのモデルにおいても走行状況によって変化するらしいことがうかがえる。

しかし、得られた追従走行モデルを用いてサグにおける隘路現象を想定したシミュレーションを行ってみると、容易に追突を起こしてしまう結果となっている。推定されたモデルでは前方車の急減速といった状況に対応できず、いわば見え運転ともいような行動で前方車に突っ込んでしまっているのである。

続いてXingらは、実際のサグ地点における渋滞の発生時や渋滞の継続中の車両の挙動を把握するために空中からビデオ撮影を行った⁴⁵⁾。撮影対象は東名高速道路の東京方向上り線の秦野サグ付近で、ここも頻繁に隘路となるサグである。ビデオ画像にはサグの縦断曲線区間の終端部付近の約300mの範囲が撮影されており、これを画像処理して個々の車両の地図上の位置を各コマ毎に落とす作業を行い、各車両の走行軌跡を得ている。その軌跡をもとに、渋滞発生のかきかけとなる後方へと伝播する大きな減速波に巻きこまれた39台の各車両に追従走行モデルを当てはめ、パラメータの推定を行っている。しかしながら、各車両のモデルパラメータはかなりばらついており、車両の追従順番を変えてシミュレーションを行うとやはり追突現象が発生する結果⁴⁶⁾となっている。

多目的最適制御の応用例

国外に目を転じると、高速道路の個々の車両走行挙動をシミュレートする代表的なプログラムとして、米国のFHWA (Federal Highway Administration) で開発されたINTRAS、さらにこれを継承したFRESIMがある。このシミュレーションプログラムは対象を非混雑状況の自由流として、幾何構造、車線障害、ランプの設計、織り

込み区間といった局所的な交通流の検討に使用されるものである。このように再現する対象が非混雑時に絞られているため、このモデルでは混雑時にみられるような停止—加速状況を良好に再現することができていなかった。この問題点を改良するために、多数の入力情報から人間の操作を模擬しようとする試みとして、Benekohalらは新たな追従走行モデルを提案している⁴⁴⁾。

このモデルは、追従車の加速度を追従車両の加速能力、希望速度、停止からの発進遅れ、追従時の車間距離制限、追突制限の車間距離、等の各条件から実行可能となる加速度群から、実行する操作をある基準で選択して決定するモデルとなっている。いわば多目的最適制御として、条件の全てを同時にそれ以上満足する解のない状態（非劣解）を出力するモデルと言える。

開発したモデルはTreitererらがヘリコプターを用いて16mmフィルム撮影で観測した車両走行軌跡データ⁴⁵⁾で検証している。検証例としてあげられた65秒間の範囲で示された距離—時間図に関する限り、減速時は良好に再現されている。しかし停止からの速度の回復が観測データよりかなり急であることが問題点として指摘できよう。本研究が対象とするような渋滞流からの弱い加速状況は再現されておらず、数キロにわたる長い区間の車両走行を検討するにはまだまだ不適当である。

ファジィ制御の当てはめ

多数の入力情報を基にした運転者の操作を模擬しようとする試みは、別の角度からも実施されている。人間である自動車運転者の走行速度の調節操作のプロセスとはあいまいな入力情報の把握と出力操作である、と捉え、これをファジィ制御⁴⁶⁾としてモデル化を試みる事例が近年見られるようになった。

大口ら⁴⁷⁾は数式によって記述された越のモデル(2.5)をベースに、相対速度、希望車間距離からの偏差、希望速度からの偏差を入力情報とし、各入力情報からファジィ推論によって独立して操作加速度を算出し、これらの総和を実現操作として出力する車両走行モデルを提案した。

提案されたモデルは、式(2.5)における各項の感度を表す関数関係をファジィ演算に置き換えたものに相当している。ファジィ演算の導入によって、入力情報から出力加速度への複雑な入出力関係がより柔軟に記述できうる点が期待されるが、開発したモデルをシミュレーションで評価したところ、数式モデルより若干の向上が見うけられた程度で、サグ地点の現象のシミュレートを試みると、やはり衝突が生じ、目的とした現象の再現ができない結果に終わっている。

Kikuchiら⁴⁸⁾はこれとは別に車間距離、相対速度、先行車の加速度を入力情報として追従車の反応加速度を出力とするファジィ制御モデルを提案している。車間距離

の評価に当たっては、走行速度に応じた「ちょうど良い」車間距離を考慮し、相対速度と前方車の加速度を基に前方車の速度に合わせようとする制御行動と、「ちょうど良い」車間距離に合わせようとする制御行動の和を実現操作として出力する形式となっている。このように、自動車運転者の追従行動の考え方は大口らのファジィモデル、あるいはそのベースである越のモデルに類似したものである。しかしモデルの同定は詳細に実施されておらず、特徴をシミュレーションで検証したのみで、実際の走行データによる確認段階に至っていない。

人間が数式モデルを使わずに制御をしているのは確かである。しかしむやみに大ざっぱな制御をしているわけでもない。例えば、熟練した自動車運転者と、まったくの初心者とは、ブレーキの掛け具合など、大きく異なることは容易に想像できる。自動車運転者は過去の経験から頭の中にある、自己の操作に応じた車両の動作モデルを使い、動作予測をしながら制御していると考えられる。したがって動作モデルの正確さやその使い方により、制御結果として現れる車両の挙動は異なるであろう。ファジィ制御の考え方の導入の成否は、数式モデルの場合と同様に適切なモデリングの可否にかかっていると評価できよう。

以上のように、追従走行挙動の研究は過去いくつかの事例があるが、運転者の操作を十分に反映した実用的な追従走行モデルはまだ開発されていない。また運転者の追従挙動特性とサグの陥路現象との関係を定量的に明らかにし、サグの陥路現象を規定している要因を究明した研究例もないのが現状なのである。

第3章 サグの隘路現象

この章では、サグ地点をはさんだ上下流の数箇所の道路断面における通過交通量と平均速度といった、個々の車両の動きを集計した量からサグの隘路現象の特徴を明らかにする。そして断面における交通流の観測によってどの程度隘路現象を理解することが可能かを検討してみることにする。サグ渋滞の例として、都市間高速道路と都市内高速道路の事例を比較し、加えて車線毎の交通現象の比較を行う。

3.1 都市間高速道路におけるサグ渋滞

まず都市間高速道路におけるサグを原因とする隘路現象の典型例を見てみよう。ここで取り上げるのは、東名高速道路の神奈川県秦野サグ（東京から47キロポスト[kp]地点）付近の東京方向の交通流である。現在この秦野サグは、東名高速道路の東京方向上り線において、最も渋滞の深刻な隘路となっている。上り勾配をプラスと定義すると、このサグでは東京方向に-2.6%から-0.3%へ縦断勾配が変化する³⁰⁾。縦断勾配の変化点をはさんだ上下流とも下り勾配であるが、車両の進行方向に縦断勾配が増加しており、これもひとつのサグである。-2.6%から-0.3%への+2.3%の縦断勾配の変化区間には500mの縦断曲線が入っている。

図3.1のようにサグをはさみ、上流側に1箇所（47.5kp）、下流側に2箇所（46.6および45.9kp）の計3箇所の断面において1分間毎に集計された通過交通量と平均通過速度のデータを用いる。このデータは、1991年7月28日（日）の13時から17時まで4時間にわたって、同時に3箇所の跨道橋から撮影されたビデオ映像から計測されたものである。

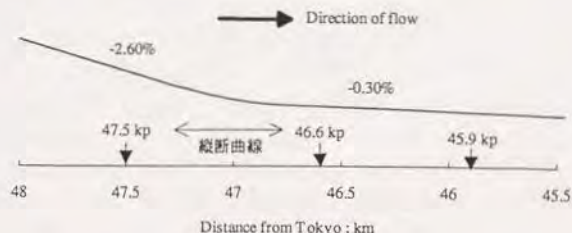


図3.1 秦野サグの縦断構造と観測断面位置

交通量の変動特性

図3.2は走行車線と追越車線の2車線分を合計した、1分間の通過交通量の時間変動を3箇所重ね合わせて示したものである。3箇所の観測断面はこれら間に入出口がなく、しかも1.6km程度の範囲内に位置するから、当然のことながら変動状況はほぼ一致する。

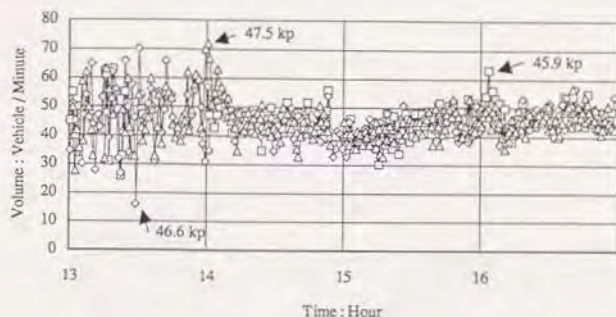


図3.2 2車線合計した1分間交通量の時間変動

目を引くのは、14時頃に交通量がピークを迎えたあと、10分間程度をかけて低下し、その後は3箇所とも変動幅が小さくなり、1分間の通過交通量が40～50[veh/min/2-lane]の範囲に落ち着いていることである。自動車交通流は通常車群を形成するため、1分間に通過した車両台数をカウントすると、車群が通過した1分間はかなり大きな値となるが、そうでない時には低下して変動が激しいものである。この特性は14時以前によく見ることができる。ところが14時以降に1分間交通量の変動幅が極端に小さくなったのは、交通流を整流化する事態が生じたい、ということになる。実はここで渋滞現象が発生したのである。

14時以降の1分間交通量を60倍して1時間当りのフローレートに換算すると、2400～3000[veh/hr/2-lane]程度に相当する。この値はサグが渋滞となった直前の14時頃、47.5キロ地点において、4000[veh/hr/2-lane]程度に相当する高いフローレートが数分間連続して観測されているのに対照的な低さである。

2車線合計の通過交通量を走行車線と追越車線双方の車線別交通量として分離してみたものが図3.3である。上流側から交通流の方向に3地点の図を並べており、追越車線が塗りつぶし、走行車線が白抜きの点でプロットされている。これを見ると、渋滞となった14時以前にはどの地点も追越車線の交通量が際立って大きいことが解

る。すなわち、追越車線の利用率が大きいのである。また追越車線では14時を境に交通量が大きく低下するのに比較して、走行車線ではむしろ若干上昇している。14時以前は、追越車線において1分間で30台以上、1時間当たりのフローレート換算値で2000[veh/hr/2-lane]レベルが頻出しており、14時ごろの47.5キロ地点では実に安定後の2車線合計交通量に匹敵する交通量が1車線で通過できている。このように追越車線において隘路現象の発生がより明瞭に現れている。

しかし14時以降は、地点によって様相が異なる。サグ上流の47.5キロ地点とサグ付近の46.6キロ地点では追越車線の交通量が若干大きいものの、両車線の交通量の差はほとんどなくなって、ほぼ均等に利用されている。一方サグ下流の45.9キロ地点では、14時以降も追越車線の方が交通量が大きく、サグ下流では走行車線から追越車線へ車線変更する車両が目立ってくるのが読みとれる。

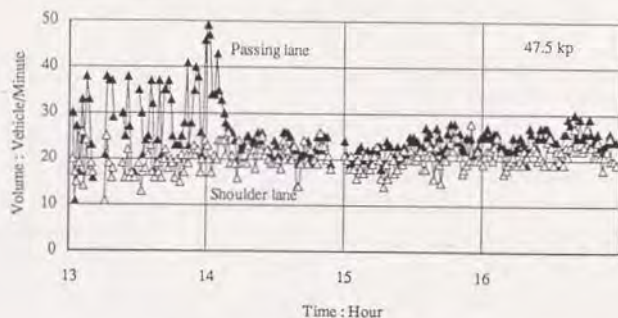


図3.3(a) 秦野サグ上流47.5キロ地点の車線別交通量変動

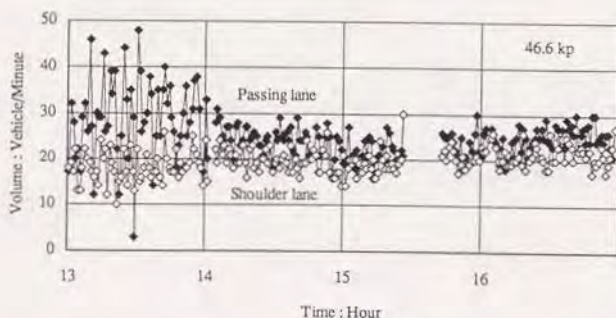


図3.3(b) 秦野サグ付近46.6キロ地点の車線別交通量変動

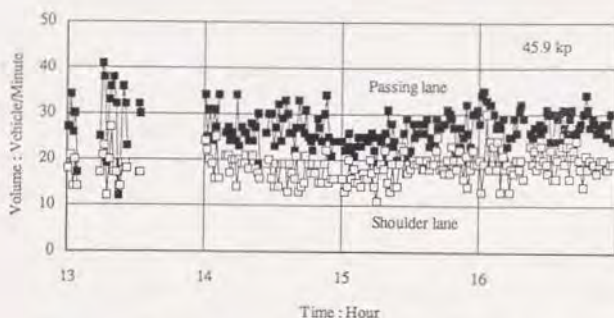


図3.3(c) 秦野サグ下流45.9キロ地点の車線別交通量変動

通過平均速度の変動特性

次に、速度の時間変動に注目しよう。図3.4は各観測断面を通過した車両の1分間集計平均速度の時間変動である。14時以前は観測地点3箇所とも100[km/hr]程度の高いレベルであったものが、14時以降には見事に3分化しており、14時頃にサグ地点において渋滞現象が始まったことがよくわかる。先ほど見た通過交通量とその変動幅が低下した理由は、渋滞現象が発生後、サグの交通容量が発生前に比較して低下し、なおかつ低い値のまま時間の経過に関わらずほぼ定常的であったためであった。

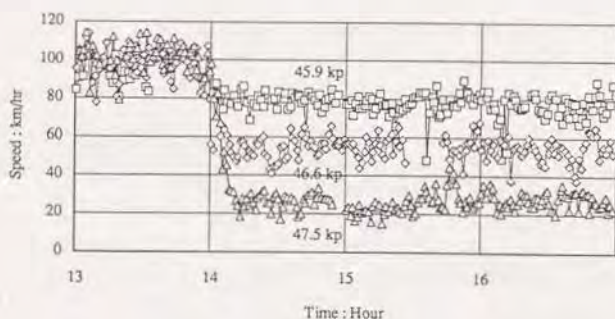


図3.4 2車線平均した1分間平均速度の時間変動

サグから500mほど上流となる47.5キロ地点では、渋滞した交通流と解るほぼ定常

的な20~30[km/hr]の低速を保っている。一方、サグを通り過ぎ、400m程下流の46.6キロ地点では、50~60[km/hr]、さらに700m程下流の45.9キロ地点では80[km/hr]程度でそれぞれ安定している。このように渋滞現象が発生した後、これら3地点の平均速度はそれぞれ時間的にはほぼ定常と見なしてよいであろうが、位置的には定常ではない。すなわち大局的には全ての車両が同様な加速挙動を保っていることになる。そしてこの時の加速度は大層小さい。加速行動を等加速度運動と見なすと、この加速度は $0.1[m/s^2]$ ($=0.01g$)程度に相当する、ごく小さいものである。

通過平均速度の時系列変化を車線別にみると、図3.5に示すように渋滞の発生前には圧倒的に追越車線の平均速度が高い。3箇所とも車線間でおおよそ10[km/hr]程度の差が見られる。しかし渋滞発生後は、追越車線の平均速度が若干高いものの、両車線の平均速度の差はほとんどなくなっている。

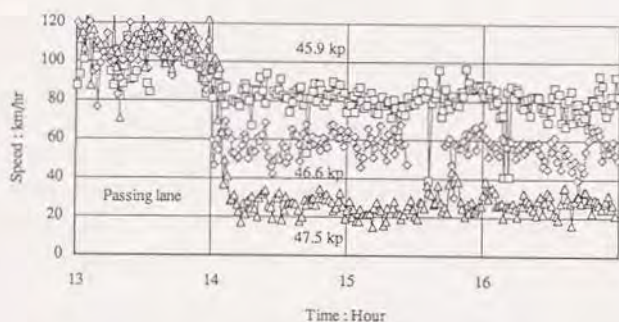


図3.5(a) 追越車線の1分間平均速度の時間変動

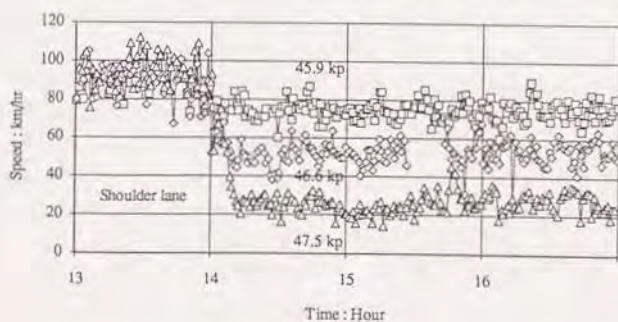


図3.5(b) 走行車線の1分間平均速度の時間変動

3.2 首都高速道路におけるサグ渋滞

首都高速道路では、東名高速道路のような都市間高速道路に比較すると、平日において交通量が多いという特徴を持つ。また走行車両の多くは日常的な業務交通を目的とするトリップである。またインターチェンジやオン／オフランプは設置間隔が狭く多数存在するので、トリップ長の比較的短い場合もかなり含まれている。

首都高速道路で日常的にみられる渋滞は、おもに複数の路線が合流するインターチェンジを先頭とするものであって、サグを隘路とする渋滞現象は目に見えて現れていない。おそらくサグ構造が影響しているものと考えられる。1号線羽田トンネル、湾岸線東京港トンネルといった海底トンネルでは、トンネル内部の縦断線形がサグであるのほかに、トンネル構造であるために走行環境が狭く暗いこと、また分合流部が近接していることなどの要因が複合して隘路となっているものと考えられている。

ここでは、首都高速道路においてサグ渋滞として現に顕在化しているものとしては数少ない例である4号線代々木サグにおける現象を見ながら、都市間高速道路の例と比較し、類似点と相違点を検討する。東名高速道路の場合と同様に、サグ上流側に1箇所、サグ下流側に2箇所の計3箇所における通過交通量と平均通過速度の変動に注目する。首都高速道路では、概ね300mおきに車両感知器が設置されているので、首都高速道路公園に提供していただいた1分間集計の車両感知器データを用いて隘路現象を見ることにする。なおここでは、隘路現象の特徴がより明瞭に現れる追越車線の交通流に注目する。

代々木サグでは、郊外方向下り線の交通流において平日にはほぼ毎日夕方から夜にかけて帰社・帰宅交通が集中することを主因として隘路現象が発生している。

図3.7と図3.8は、この付近の1991年5月24日(金)の夕刻4時間にわたる、交通量と速度の変動を車両感知器の1分間集計データを用いて示したものである。観測地点は図3.6のように代々木サグ上流の3.85キロ地点、サグ付近の4.05キロ地点、下流の4.52キロ地点の3カ所のそれぞれ追越車線である。図3.7は通過交通量の変動、図3.8は平均速度の変動をあらわす。

17時過ぎに一旦交通量が上昇した後交通量の変動幅が目立って低下しており、東名高速道路秦野サグの場合と同様な隘路現象が始まっていることがわかる。そして17時30分以降は渋滞が安定して、交通量、平均速度ともに安定して推移していることを見ることができる。注目されるのは、サグ渋滞の安定後においても隘路の容量が $30 \sim 35[\text{veh}/\text{min}/\text{lane}]$ と、1時間当たりに換算したフローレートは約 $2000[\text{veh}/\text{hr}/\text{lane}]$ に相当し、東名高速道路の場合に比較してかなり高いことである。

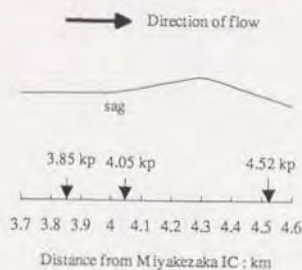


図3.6 首都高速道路4号線下り線代々木サグの縦断構造と観測断面位置

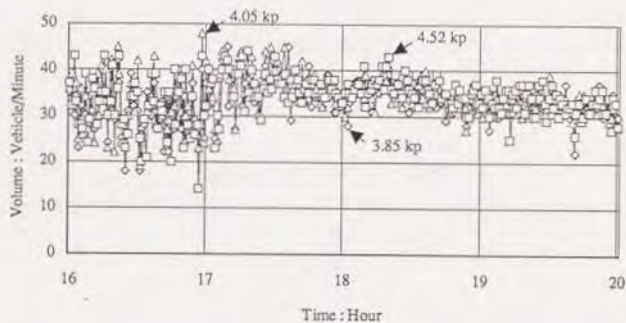


図3.7 首都高速道路4号線下り方向代々木サグの1分間交通量の時間変動

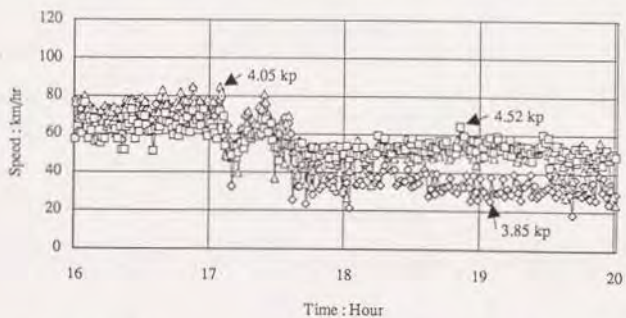


図3.8 首都高速道路4号線下り方向代々木サグの1分間平均速度の時間変動

一方代々木サグにおける、逆方向の都心方向への交通流については、都心環状線との合流部である三宅坂インターチェンジから4キロ程度しか離れていないこともあって、より交通容量の低い三宅坂合流部あるいはその先の都心環状線に存在する隘路を先頭とする渋滞列にこの区間がおおわれることが多く、日頃はサグを先頭とする渋滞は顕在化していない。

しかし、都心環状線との合流部から渋滞が延伸していない時には代々木サグが先頭となる渋滞も発生しうるのである。観測地点は図3.9のような配置構成で、代々木サグの上流側の4.45キロ地点、下流側の3.96キロと3.76キロ地点の3箇所である。

図3.10、図3.11は1991年5月27日(月)朝5時から9時までの4時間にわたる逆越車線の交通量と平均速度の1分間データの時系列変動である。

朝5時から6時にかけて都心方向の交通量が立ち上がった後、7時以降に隘路現象の発生を見ることができる。このケースで興味深いのは、7時頃に3カ所とも一旦速度が40[km/hr]以下に低下した後に隘路現象が現れた点である。この速度低下の原因は不明であるが、3箇所を含むサグ区間が低速走行の車列でおおわれたあと、サグ上流の4.45キロ地点では速度回復ができずに、サグを加速の開始地点とした安定した隘路現象に落ち込んでしまうことが現れている。また、8時過ぎに一旦速度が回復しそうになったが、これも実現できずに再び低速に落ちついている。サグが隘路として停留してしまうのは、速度回復を困難とさせるような加速挙動に糸口がありそうなことを示唆している。

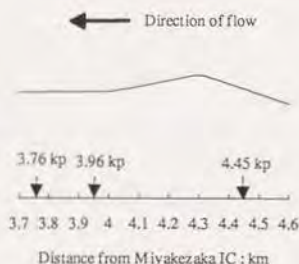


図3.9 首都高速道路4号線都心方向代々木サグの縦断構造と観測断面位置

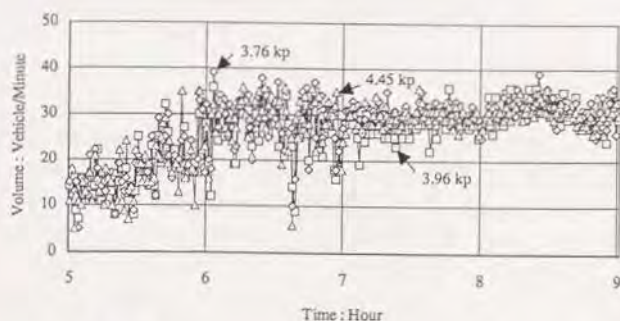


図3.10 首都高速道路4号線都心方向代々木サグの1分間交通量の時間変動

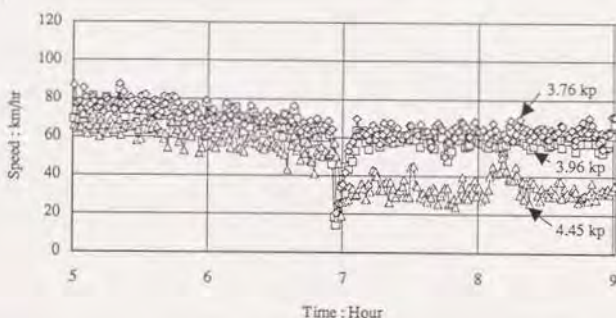


図3.11 首都高速道路4号線都心方向代々木サグの1分間平均速度の時間変動

以上のように、サグの陥路現象の大局的な概要は、道路断面における観測によって把握することができる。しかし、路側から道路断面を通過する車両の速度や台数を計測するだけでは、おのずと把握できる知識にも限界がある。

たとえば渋滞が定常的にサグを陥路とする理由や、状況が変化しそうになっても安定した状況に引き戻される理由を知るためには、交通流を構成する各車両がどのような加速や減速を行いながら追従走行を行っているかを把握しなくては明らかにすることができない。そして車両の走行挙動を観測するためには、ある程度の区間において車両の動きを連続して計測する必要がある。次章には、このようなねらいから車両1台1台の走行データを計測し、分析する。

第4章 車両走行データの収集と分析

本章では、自動車車両の追従走行挙動を理解するために必要となる車両走行データの収集と分析について述べる。前章では道路断面を通過する車両の走行状況を集計したデータによって、交通流の特性分析を試みた。これに対してこの章では、車両毎の時間を追った走行動態を分析することを目的とする。まず、追従走行実験と交通流のビデオ観測の方法について、次にこれらの方法から得られた走行データの分析結果についてまとめる。

4.1 試験車両によるデータ収集

4.1.1 試験走路における追従走行実験

この実験は、追従走行する車両の運転者に課する前方車両の走行条件をコントロールし、広い範囲にわたる前方車両の走行条件下での追従行動の基本構造を把握することをねらいとして実施したものである。実験は、建設省土木研究所道路研究室の協力をいただき、茨城県つくば市土木研究所内の試験走路で行われた。試験走路は周回路となっており、1周6152mで途中に2箇所の平面曲線部をもつ。なお、車両の進行方向に縦断勾配はなく、平坦である。

実験は、1992年12月11日(金)、走行動態を計測可能な試験用乗用車を2台走行させることによって行った。先導車両の運転者には目標とする走行速度の変化パターンを示し、これに従って走行するように指示した。

先導車両の目標走行速度パターンは、定速で走行する速度のレベルとその継続時間、および加減速度の大きさとその継続時間の各項目において、広い範囲をカバーするように準備されたものである。なお、試験走路の2箇所の平面曲線部(曲線半径はそれぞれ222.5mと147.5m)を高速で通過するには、遠心力がかなり大きくなり、自然な追従走行から外れてしまう可能性がある。そこで、先導車が80[km/hr]程度の高速で平面曲線区間を通過することがないように、先導車に同乗したナビゲイターが定速走行の時間を調節し、加減速のタイミングを運転者に指示することにした。

追従走行の被験者には5人を用意し、昼間と夜間の2回、それぞれ20~30分間程度の連続走行を実施した。5名の運転者はすべて20~25才の男性である。追従車両の運転者には前方の車両に普段行っていると同様に追従して走行するように指示した。ただし、実験であるから、被験者の走行挙動には実際の道路上における挙動

との差異があり得ることに注意する必要がある。

実験における測定項目は、先導車両および追従車両の速度と加速度、車間距離、先導車両のブレーキランプの点灯の有無の6項目である。各測定項目はそれぞれタイヤの回転数、搭載したひずみゲージ、レーザー車間距離計、ブレーキランプへの通電という、電圧信号として計測される。過去の実験¹⁰⁾ではこれらをデータレコーダに収録していたが、今回はコンピュータを車両に搭載して、車上で即時に計測データのA/D変換を行い、デジタルデータをメモリに取り込むよう、工夫を施した。すなわち、先導車両にコンピュータを搭載してこの車両の走行状況を0.1秒周期でリアルタイムのA/D変換を行い、収録したわけである。一方追従車両の走行状況は、テレメータ装置により無線送信し、これを先導車両において受信した後これも合わせてA/D変換し、収録している。

この実験では、追従走行の被験者が複数であるため、被験者に課する先導車両の走行パターンができるだけ均質となるように配慮した。そこで先導車の走行パターンとして走行速度そのものに加え、速度変化の際の加減速度も指定された大きさに近づけるように指定しているのである。さきに述べたように、コンピュータの搭載によりオンラインで走行速度が測定できることを利用すれば、これを時間で微分することによって加速度値を算出することができる。この算出された加速度をダッシュボードにLED表示することによって、先導車の運転者が指定されたパターンに沿って加減速調節を行うための支援機器とすることが可能となった。図4.1は追従走行実験の状況である。



図4.1 追従走行実験の状況

追従走行実験後、各データのキャリブレーションの後、2台の車両の速度、加速度、および車間距離という時系列的に相互関係のある物理量に対してカルマンスムージング¹³⁾を施し、0.1秒毎の走行状況が記録された走行データを作成した。

4.1.2 中央高速道路における走行実験

この実験は、中央高速道路の隘路となるサグを含む区間において追従走行実験に使用した試験用乗用車を走行させ、実際の交通流の中における走行挙動を観測したものである。被験者は著者1名である。

この走行実験は、現実の交通流における追従走行であるから、追従車両の運転者に課する前方車両の走行条件をコントロールすることはできない。したがって、サグを含む道路区間における、渋滞中の走行速度の変動を把握することをねらいとしたものである。

走行実験は1993年5月1日(土)に行った。この日は曇天であったが、ゴールデンウィーク前半の土曜日にあたり、中央高速道路名古屋方向下り線では、第1章で紹介したように東京から山梨県大月市までの区間のいくつかのサグで隘路現象が発生した。この区間において最下流に位置する中野サグを先頭とする渋滞について、これをはさむ上野原インターチェンジから大月インターチェンジの間を3往復し、3回の渋滞走行と隘路からの加速状況を観測することに成功した。

観測データとして収集されたのは、試験車両の速度、加速度、前方車との車間距離、ブレーキランプの点灯である。これも車載のコンピュータでデータを収録し、追従走行実験後、速度と加速度という時系列的に相互関係のある物理量に対してカルマンスムージングを施し、0.1秒毎の走行状況データを作成した。

さらに走行状況データから、62キロ地点に位置する中野サグを隘路とする渋滞交通流とサグからの加速交通流が含まれるように、59～69キロ地点までの10km区間の走行データを抽出し、3つのデータセットに編集した。この10km区間について、走行に要した時間は、それぞれ第1回目が約14分間、第2回目が約16分間、第3回目が約14分間であった。

図4.2はこれら3つのデータセットについて、実験車両の走行位置とその位置における走行速度との関係を重ね合わせて表したものである。3回の走行は、インターチェンジ間の往復に要した1時間程度の時間差で行われたのであるが、類似した速度プロファイルを示しており、前章で見たような隘路現象の安定した状況が中野サグにおいても同様に生じていることを見ることができる。

この区間の隘路は62キロ地点付近の中野サグであり、ここから高速道路で期待される80～100[km/hr]程度まで速度を回復するのに約2 kmを要している。一方隘路に至る59キロ地点からの約3 km区間に着目すると、渋滞した交通流に特有の速度変動が見られる。この変動は隘路地点に近づくにつれて変動幅が小さくなる傾向を有している。

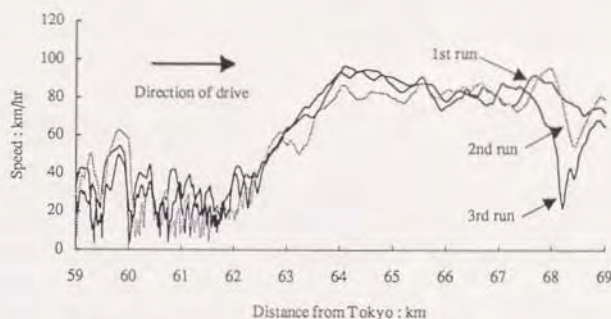


図4.2 中野サグ(62kp)付近の走行位置と速度(1993年5月1日)

また図4.2の右端近くの68～69キロ地点では、別の隘路現象が徐々に成長しつつある様子が見られる。これは、68キロ地点のサグとこの付近に位置する大月トンネル等¹⁰⁾を要因とするものと考えられる。3回の走行はそれぞれ1時間程度の間隔で走行したことを考慮すると、この隘路現象の成長はかなり遅い。これは上流にある中野サグがすでに隘路となっており、通過交通量が押さえられているため、68キロ地点付近に達する需要量が少ないことが理由であろう。

4.2 交通流のビデオ観測によるデータ収集

前節に述べた走行実験を実施すれば、特定の運転者の追従走行挙動をさまざまな条件下で、また長時間にわたって連続して計測することができる。しかし、この方法では走行挙動を計測可能な運転者の数に自ずと限界がある。また、実験走行の被験者に実験の意図を想定される可能性もある。

そこで、ビデオカメラの画角の範囲内の制約から個々の車両が観測できる区間と時間は短いものの、現実の交通流を構成する不特定多数の車両の走行挙動を観測する事をねらって、ビデオ観測を実施した。

4.2.1 首都高速道路における観測

首都高速道路において、単路単区間の交通流を高所から俯瞰できる地点として3号線渋谷地点を選定し、ビデオ撮影を32階の高層ビルから実施した。撮影された道路区間は約200m程度にわたったが、ビデオ映像から車両の位置を読み取る上で、充分車両の認識できる範囲は約160mであった。

この観測は、様々な車両による様々な状況下における加減速挙動を把握することをねらいとして行われた。また追従車両にとって、直前車両よりさらに前方の見通しやすさが挙動にどのように影響するかを理解するために、直前車両が大型車か否かで追従挙動がそのように異なるか、という点も着目点のひとつである。

観測日は1991年11月2日(土)の14時から15時半までの90分間である。このビデオ撮影の時間帯には、都心方向上り線においては撮影箇所から3.5kmほど下流にある都心環状線への谷町合流部を先頭とする継続的な渋滞が生じていた。一方郊外方向下り線では約8km下流の用賀付近で事故が発生し、このために生じた渋滞列の最後尾が観測区間付近に達したり解消したりをくりかえす、都合の良い時間帯を捉えることとなった。

撮影したビデオ映像は、まず0.2秒毎の画像を1コマとして光ディスクに再録した。次に、光ディスクにダビングされた撮影画面を1コマずつディスプレイ画面に映し出し、画面上の車両の前端および後端部の位置座標をポインティング機器で収集した。この作業を各車両について1コマずつ行うことによって、車両の画面上の走行軌跡を収集することができる⁴⁰⁾。このデータ収集作業は、膨大な時間を要するので、追越車線を走行する車両を対象を限って行った。

次に収集された画面上の各車両の位置座標列を、現場の航空写真と路面標示されているレーンマーク等を利用して座標変換し、道路進行方向の1次元の位置座標の時系列に整理した。さらにカルマンスムージングを適用して、0.1秒毎の位置、速度、加速度を算出した。

こうして得られた各車両の走行動態データは大型車を先頭とする車群に取りまとめ、大型車からの追従位置に関する車両挙動の相違を分析できるように整理した。なお、観測時間中の平均の大型車混入率は、約20%であった。

大型車からの追従順番についてデータが収集された車両の台数をまとめると、郊外方向下り線において、先頭の大型車と1台目の追従車が409台、以下2台目が340台、3台目が235台、4台目が167台、5台目が118台である。一方都心方向上り線においては、同様に先頭の大型車と1台目の追従車が128台、以下2台目が85台、3台目が56台、4台目が37台、そして5台目が17台であった。

4.2.2 東名高速道路における観測

サグ区間を走行する不特定多数の車両の走行を観測することは、サグ構造をなす区間の長さや、サグ地点に近接して高層の建造物が必ずしも位置するとも限らないことなどから容易なことではない。そこで、1990年7月29日と1991年7月28日の2回にわたって実施された、東名高速道路の神奈川県秦野サグにおける観測データ⁴⁴⁾を利用する。このデータは、東京方向上り線の交通流を対象として、上空約200mに係留された気球に搭載したビデオカメラによって交通流を撮影し、この映像をもとに画像処理手法を用いて計測されたものである。データの仕様は、200~300mの撮影区間にわたった各車両の1/9秒毎の位置、速度、加速度の時系列となっており、Xingによって編集処理がなされたものである。

2回の観測によって、1990年においてはサグを先頭とする渋滞が安定した時点の走行状況が、1991年についてはサグにおいて渋滞が発生した時の走行データが収集されている。ここではそれぞれの年に観測された、代表的な以下の2つのデータセットを使用した。

- 1) 渋滞の安定した時点の49台(1990年)
- 2) 渋滞の開始時点の39台(1991年)

図4.3は、これらのデータセットを構成する車両の走行状況を、時間-距離平面に軌跡として示したものである。時間-距離平面上では、走行軌跡の傾きは速度を表す。図の右下に時速20、40、80キロメートルに相当する傾きを付しておいた。

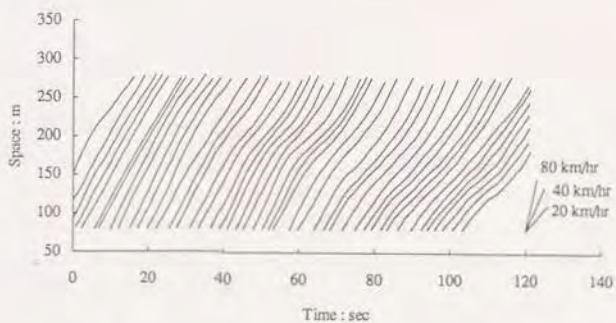


図4.3(a) 東名高速道路東京方向上り線 秦野サグ 渋滞安定後の時間-距離図
(1990年7月29日)

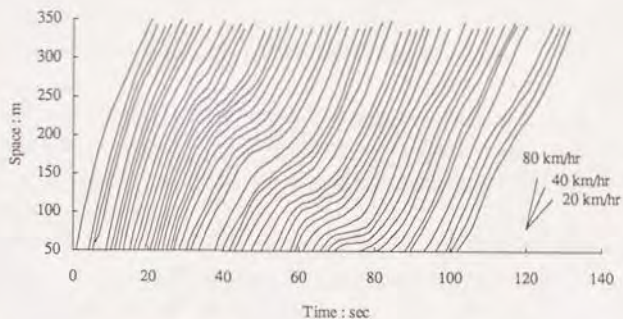


図4.3(b) 東名高速道路東京方向上り線 秦野サグ 渋滞発生時の時間-距離図
(1991年7月28日)

4.3 追従走行挙動の分析³⁶⁾³⁷⁾

4.3.1 走行速度と車間距離との関係

我々が前方の車両に追従して自動車を運転する際には、前方車との車間距離を何気なくちょうど良い程度に空けている。この車間距離は運転者の判断により、走行速度に応じて希望する適当な距離を取っていると考えられる。この各車両の選択する走行速度と車間距離の関係は、交通容量に密接な関係がある。追従走行実験とビデオによる交通流観測から、さまざまな運転者の追従走行状況が計測されたので、まず走行速度と車間距離との関係を見ることにする。

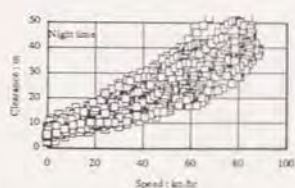
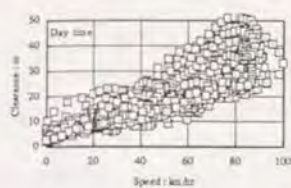
図4.4は、追従走行実験によって計測された追従走行車両の0.1秒毎の時系列データから、1秒毎に走行速度と車間距離の状態量を抽出し、縦軸を車間距離、横軸を走行速度にとった平面に両者の関係をプロットしたものである。5人の運転者のデータについて、昼と夜の2回の結果を左右に比較してある。

走行速度—車間距離の平面上には走行状況の軌跡が現れている。この軌跡は概ね時計回りのパターンをとっている。これは、追従車の走行状況とは、基本的に前方車両との車間距離の変化に遅れて速度を調節するためである。

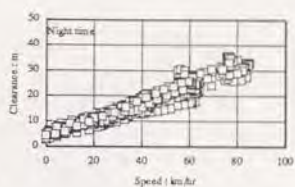
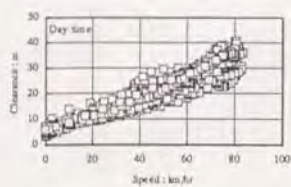
これらの図から、追従走行時においては走行速度が高くなると、これに対応して広い車間距離をとる傾向が、どの運転者についても確認できる。また、追従して走行している状態では、速度に応じて運転者のとる車間距離の自由度はさほど大きいものではないことが解る。

運転者による差異を比較すると、同じ走行速度においても車間距離に若干の相違が見受けられる。これは、運転者によって望ましいと判断する車間距離の基準が異なる、個人差を反映しているものと思われる。また、同じ運転者による昼と夜の差異は、個人差に比較して小さいことがわかる。

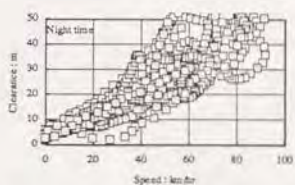
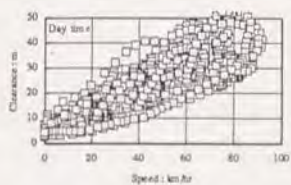
走行速度と車間距離との平均的な関係は、直線関係というよりはやや高次の関数関係と言えそうである。



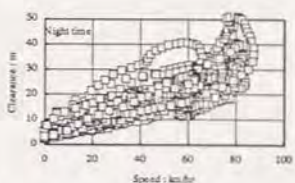
運転者 A



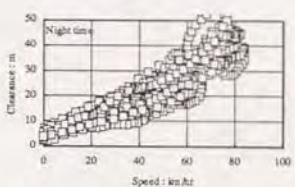
運転者 B



運転者 C



運転者 D



運転者 E

図4.4 追従走行実験による5人の運転者の車間距離-走行速度関係
(昼間および夜間のケース)

次に図4.5は、中央高速道路の中野サグを含む区間を走行した3回のうち、第1回目と第3回目について、同様に車間距離—走行速度の関係を1秒毎にプロットしたものである。それぞれ停止と約50[km/hr]の範囲にわたる加減速を繰り返した後、隘路のサグを通過し、速度を回復した状況が表れている。車間距離—走行速度の履歴は走行実験の5人と大きな隔たりは見られない。

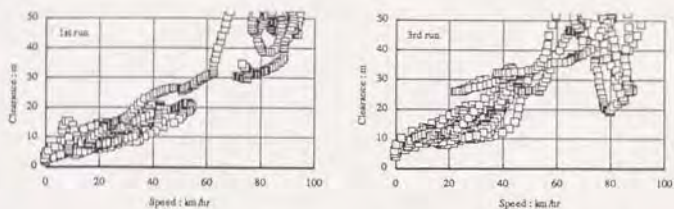


図4.5 中央高速道路走行時の車間距離—走行速度関係

また、図4.6は首都高速道路のビデオ観測から得られた数多くの車両の断片的な追従走行データから、走行時の加速度の絶対値が $0.5[\text{m/s}^2]$ 以下の定常的な走行状況のみを抽出し、さらに5[km/hr]ピッチで平均車間距離を算出した結果をあらわしたものである。左側が郊外方向下り線、右側が都心方向上り線におけるデータである。右側の都心方向上り線のデータは3.5kmほど下流の谷町合流部を先頭とする渋滞が継続していたため、50[km/hr]を越える走行速度は実現していない。

両方の図とも大型車を先頭とする車群のうち、1台目と2台目の追従順番にあった車両のデータをまとめて平均した結果を重ね合わせて示している。なお3台目以降は、2台目とほぼ同様な結果であったので省略している。これら実際の交通流から計測したデータをもとに得た図からも、走行実験の運転者の結果と類似した傾向を確認することができる。また、大型車直後の車両は若干ではあるが、大きめの車間距離をとっていることが見受けられる。

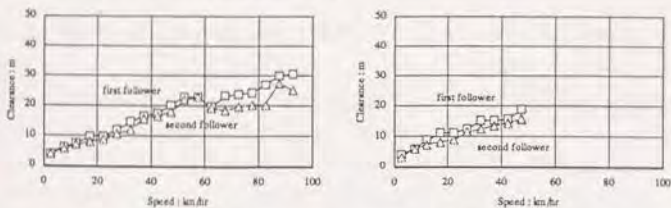


図4.6 首都高速道路の車間距離—走行速度関係(定常走行時)

4.3.2 相対速度と加速度との関係

相対速度—加減速のタイムラグの解析

2.3で紹介したGMモデルに代表される既存の追従モデルでは、追従車両の加減速操作の主な要因とは、直前車両との相対速度への反応であるとされている。また、相対速度と追従車の加減速とは1秒程度のタイムラグをもって相互相関が高いことが既往の走行実験等で解っている。しかし、タイムラグは一定値を想定しており、その変動特性については明らかにされていない。そこで直前車両との相対速度と追従車両の加速度操作との関係が、実際の交通流における不特定多数の運転者でどのように分布するかを首都高速道路のビデオ観測データから分析する。

ここでは、追従車の1回1回の加減速行動に関してその開始時刻におけるタイムラグの特性を分析した。すなわち、相対速度が正から負、または負から正に転じたときからこれに応じて減速、または加速を開始するまでのタイムラグに注目したのである。これは、タイムラグとは一定値ではなく、相対速度が正から負、または負から正に符号が転じるときの走行状況が、これに応じた減速、または加速を実現するまでのタイムラグを決定するのではないか、という仮説を確かめるねらいで行ったものである。

その分析結果を図4.7と図4.8に示す。図4.7は減速開始時、図4.8は加速開始時のタイムラグの分析結果である。図4.7および図4.8共に、(a)は大型車の直後に位置した追従車に関するものであり、(b)は大型車から2番目に位置した追従車に関する結果である。それぞれの結果は、3種類の図がセットになっている。縦軸はすべてタイムラグである。横軸は相対速度の符号が転じたときの走行状況で、左上が車間距離、右上が追従車の走行速度、左下が前方車の加速度である。なお、3台目以降の追従車は2台目の追従車と同様の傾向を示しているので省略した。これらの図から解ることは次のようなことである。

まず、図4.7の減速開始時について考察すると、タイムラグは0.5秒から3秒程度の範囲に分布していることがわかる。タイムラグと走行状況との関係に関しては、車間距離と走行速度は、これらの値の大きい方がタイムラグも大きい傾向とも見られるが、その貢献度合は小さく、目立った差異はない。

むしろ注目されるのは、前方車の加速度の効果である。相対速度の変化時点の前方車の加速度は、これが小さいほど、言い換えると、減速度が大きいほど、追従車の減速開始のタイムラグが小さいということがわかる。

また、大型車から1台目と2台目の結果を比較すると、2台目では「負のタイム

ラグ」、すなわち車間距離が狭まり始めるのに先立って減速を開始しているケースが10ケースほど現れている。

次に図4.8の加速開始時について検討すると、タイムラグは0.5秒から5秒程度までの、減速時に比較して広い範囲に分布している。タイムラグへの走行状況の効果としては、車間距離、走行速度ともに小さい状況でタイムラグの大きいケースが目立っている。車間距離が開き始めてから加速を開始するまでのタイムラグが、低速で近接した状況で目立つのである。

また、前方車の加速度の効果は減速開始時とはちょうど裏返しの傾向が見て取れる。車間距離が広がり始めた時刻の前方車の減速度を見ると、前方車の加速度が大きいほど敏感に加速を開始している。逆に車間距離が広がり始めても、前方車が依然として減速行動から回復していない場合には、追従車が加速を開始するまでのタイムラグが大きい、という特性もあらわれている。また大型車からの追従順番による差異は、減速開始時に比較すると顕著ではない。

以上の分析結果を総合すると、追従車が加速及び減速の開始する時の相対速度に対応したタイムラグは、その前方車の加減速状況に依存する程度が高いといつてよさそうである。

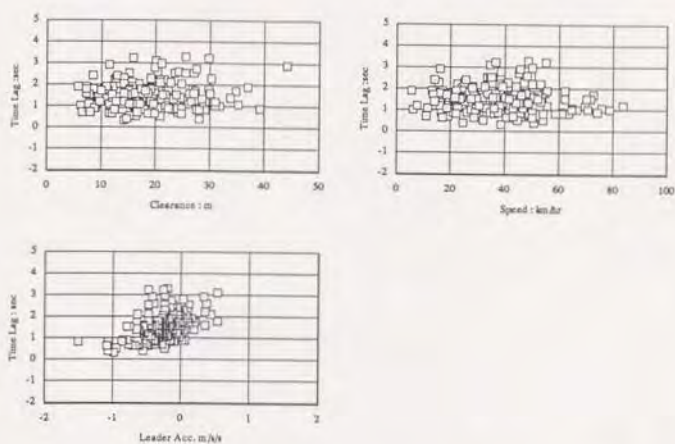


図4.7(a) 大型車直後の追従車の減速開始時タイムラグ

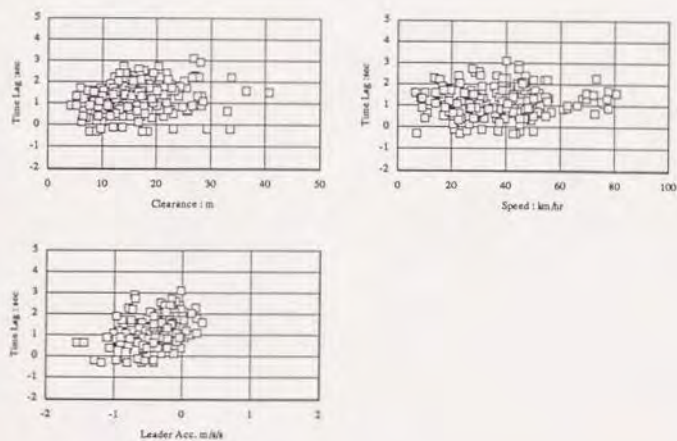


図4.7(b) 大型車から2番目の追従車の減速開始時タイムラグ

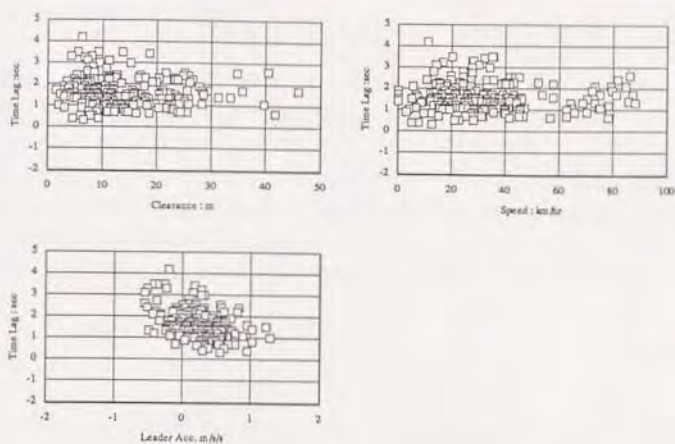


図4.8(a) 大型車直後の追従車の加速開始時タイムラグ

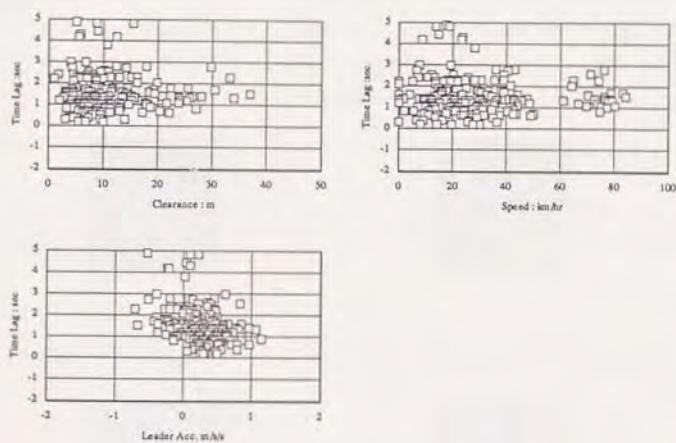


図4.8(b) 大型車から2番目の追従車の加速開始時タイムラグ

相対速度に対する反応感度

次には、相対速度に対する加速度の反応感度を検討する。このねらいは、反応感度が一定値であるのか、あるいは走行状況に依存するのか、また加速時・減速時で差異があるのか、を確認することである。

推定の方法は、第2章で紹介したGMタイプの追従モデルを仮定し、実現した加速度と相対速度との相互相関係数を評価するのである。反応感度は、以下のような追従車の速度と車間距離の関数であると仮定した。 l と m はパラメータであり、これらがゼロに近い結果ならば、反応感度は一定値と見なしてよいことになる。

$$\frac{[V_F(t)]^m}{[S_F(t)]^l}$$

先のタイムラグの分析でわかったように、相対速度に反応した追従車の加減速のタイムラグが変化することを考慮し、相関分析に関しては、対応する相対速度と加減速の継続期間が一致するように調節した。式の l と m をパラメータとして、相互相関分析を実施した結果を図4.9に示す。これは、縦軸を m 、横軸を l とした平面上に相関係数のコンター図で示したものである。濃淡のトーンの同じ部分は相関係数の等しい領域であり、各図で幾重にも描かれた楕円形の中央部が相関係数が0.8~0.9程度のもっとも高い部分である。図4.9(a)は大型車直後の追従車、図4.9(b)は大型車から2番目の追従車であり、左側が減速時、右側が加速時の結果である。



図4.9(a) 反応感度のパラメータの相関分析結果(大型車直後の追従車)



図4.9(b) 反応感度のパラメータの相関分析結果(大型車から2番目の追従車)

これで見ると解るように減速時と加速時とでは、反応感度の関数構造において相関係数の高いパラメータ l と m の組合せの分布が異なっている。左側の減速時では、 $(l, m) = (1, 1)$ 付近の組み合わせがもっとも相関が高い。一方右側の加速時では、 $(l, m) = (0.5, 0.0)$ あたりを中心に高い相関の組み合わせが分布している。

この結果から、相対速度に対する加速度の反応感度についても、これを一定値とみなすことは適当とは言えないことがわかる。さらに加速時と減速時とでその様相が異なり、減速時には車間距離と走行速度の両者に依存するのに対し、加速時には速度に対する依存度合いが小さいことが明らかになった。

第5章 追従走行モデルの提案

この章では、第4章で得られた追従走行挙動の分析結果をもとに、自動車車両の追従走行モデルを提案する。この追従走行モデルのパラメータを推定する方法とその結果についても述べる。

5.1 既往の追従走行モデルの吟味

2.3でふれたように、自動車車両の追従走行モデルの構造を仮定し、実測された車両の走行データを用いてモデルのパラメータを推定した研究例を過去いくつか見ることができる。これらの研究においても、パラメータ推定に使用した追従走行データに関しては、結果として実際に観測された車両挙動と合致度が高いモデルが得られているはずである。しかし、車両の自然な運転挙動から生ずると考えられるサグの陥路現象を研究するために使用できる実用的な追従走行モデルは、これまでのところ開発に成功した例がない。

そこでこの節では、最近Xingによって東名高速道路のサグ付近の走行車両のデータをもとに推定された追従走行モデル¹⁰⁾を代表例として、既往モデルの構造とパラメータの推定方法について吟味してみることにする。Xingの研究では、式(5.1)のようなモデル構造を仮定している。

$$\begin{aligned} V_F(t) = & \alpha \cdot (V_L(t-T_1) - V_F(t-T_1)) \\ & + \beta \cdot (S(t-T_2) - f(V_F(t-T_2))) \\ & - \gamma \cdot \theta \\ f(V_F) = & a_3 V_F^3 + a_2 V_F^2 + a_1 V_F + a_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここに、 $f(V_F)$ は走行速度に応じた希望する車間距離の関数である。

この式(5.1)の意味するところを整理すると、追従車の加速度とは、相対速度への反応である第1項、実際の車間距離と希望する車間距離との偏差への反応である第2項、そして縦断勾配の影響の第3項の総和である、という仮説である。そして、希望する車間距離は走行速度の3次関数が想定されている。このモデルのパラメータは、 α 、 T_1 、 β 、 T_2 、 γ 、 a_3 、 a_2 、 a_1 、 a_0 の9個である。

4.2.2にも紹介した、東名高速道路の東京方向上り線秦野サグにおいて、陥路現象の発生時に観測された39台の約300m区間にわたる車両走行データに用いて各車両の9個のモデルパラメータが推定された結果が表(5.1)である。Xingの研究では、これらのパラメータを追従順番に従って適用してシミュレーションを実施し、実際の走行挙動がよく再現されることを示している。なお、停止時($V_F=0$)の希望車間距離に相当するパラメータ a_0 は、この研究では車両長4m程度の乗用車を想定した車頭距離に置き換え、6.5[m]と固定されている。

表5.1 Xingによる追従走行モデル⁽⁴⁾ (式(5.1)) のパラメータ推定結果

veh #	T_1 [sec]	α [sec ⁻¹]	T_2 [sec]	β [m ⁻¹ sec ⁻²]	γ	a_3 $\times 10^{-4}$	a_2 $\times 10^{-2}$	a_1	a_0
2301	0.2	0.49	3.1	0.09	0.12	0.17	-0.28	0.62	6.5
2302	0.4	1.18	2.9	0.20	0.61	0.15	-1.19	0.97	6.5
2303	0.3	1.03	3.9	0.08	0.74	0.18	-0.30	0.39	6.5
2304	0.9	0.58	3.8	0.04	0.43	0.47	-0.55	0.49	6.5
2305	0.5	0.93	4.3	0.04	0.28	0.51	-0.50	0.35	6.5
2306	0.7	0.85	3.2	0.10	0.26	0.18	-0.62	0.66	6.5
2307	0.6	0.50	3.9	0.03	0.04	0.13	0.01	0.36	6.5
2308	0.6	1.08	4.8	0.11	0.13	0.07	-0.59	0.70	6.5
2309	0.1	0.59	3.5	0.02	0.67	0.52	-0.65	1.05	6.5
2310	0.1	0.62	2.7	0.14	0.04	0.49	-1.14	0.77	6.5
2311	0.1	1.55	5.6	0.13	0.19	0.24	-0.68	0.61	6.5
2312	0.7	1.18	3.4	0.15	0.36	-0.03	-0.78	0.61	6.5
2313	0.1	0.80	6.1	0.07	0.11	-0.62	1.24	-0.08	6.5
2314	0.6	0.06	0.2	0.05	0.34	0.61	-0.71	0.90	6.5
2315	0.1	0.64	3.2	0.03	0.00	-0.24	0.66	0.19	6.5
2316	0.5	0.47	3.7	0.04	0.11	0.35	-0.38	0.57	6.5
2317	0.1	0.86	1.8	0.07	0.48	0.20	-0.44	0.38	6.5
2318	0.7	0.70	2.7	0.07	0.31	0.18	-0.41	0.59	6.5
2319	0.8	0.64	3.0	0.06	0.38	0.32	-0.59	0.75	6.5
2320	0.5	0.52	1.8	0.05	0.01	0.72	-0.79	0.63	6.5
2321	1.2	0.44	1.6	0.03	0.56	0.31	-0.45	0.72	6.5
2322	0.5	0.54	2.2	0.06	0.04	0.34	-0.40	0.57	6.5
2323	0.8	0.93	3.6	0.09	0.42	0.32	-0.85	0.52	6.5
2324	0.3	0.59	0.3	0.09	0.90	0.39	-0.82	1.14	6.5
2325	1.0	0.50	0.1	0.08	0.44	1.07	-1.94	1.37	6.5
2326	0.5	0.50	3.0	0.07	0.30	-0.08	-0.08	0.44	6.5
2327	0.3	1.43	6.9	0.13	0.25	0.21	-0.45	0.33	6.5
2328	0.9	0.83	0.1	0.01	0.86	-6.57	29.23	-6.40	6.5
2329	0.5	0.26	0.1	0.12	0.64	0.59	-1.14	0.84	6.5
2330	1.0	0.32	2.1	0.04	0.52	0.21	-0.59	1.10	6.5
2331	0.1	1.03	3.8	0.02	0.76	0.32	0.00	0.75	6.5
2332	0.6	0.74	4.3	0.08	0.00	0.52	-0.77	0.59	6.5
2333	0.1	1.33	4.5	0.19	0.04	-0.22	-0.41	0.52	6.5
2334	0.2	2.41	4.5	0.30	0.05	-0.04	-1.09	0.75	6.5
2335	1.3	0.43	5.0	0.12	0.26	-1.38	1.00	0.27	6.5
2336	0.7	0.78	5.9	0.18	0.67	-0.63	-0.54	0.80	6.5
2337	1.1	0.29	3.1	0.08	0.99	0.12	-0.67	0.89	6.5
2338	0.1	0.65	1.8	0.02	1.00	-17.19	2.02	2.31	6.5
2339	0.5	0.60	3.8	0.04	0.40	0.34	-0.38	0.45	6.5

39台の各車両について推定された9個のパラメータは、6.5に固定された a_0 以外はそれぞれさまざまな値をとっており、個人差が現れているように見受けられる。しかし、車両によって正負がさまざまであったり、けた違いとなっているパラメータも含まれている。また、相対速度のタイムラグである T_1 が0.1秒をはじめとしてはどんどの車両で1秒以下であり、相対速度に対して常時1秒以下で反応することが実際の運転者の追従走行挙動を正しく記述しているのかどうか疑問が残る。各パラメータの車両毎のばらつきが運転者の個人差をそのまま表しているかどうか、判断は難しいところである。

さらに、これら39台の車両の追従順序を変更してシミュレーションを実施すると、陥路現象を再現することができないことが解っている⁴⁴。したがって追従走行モデルの汎用性においてこれらのモデルパラメータ、あるいは式(5.1)と仮定したモデル構造そのものにまだ検討の余地があるということになる。

そこで、この追従走行モデル(5.1)によって出力される加速度に主要な貢献を果たす第1項と第2項について、モデルの構造とパラメータについて検討を加えてみることにする。

5.1.1 相対速度への反応の特性

式(5.1)で記述される追従走行モデルの第1項は、相対速度に反応する加速度を表している。この相対速度への反応だけを抜き出した式(5.2)のような相対速度モデルの特性を、簡単な例で検討する。

$$\ddot{V}_F(t) = \alpha \cdot [V_L(t - T_1) - V_F(t - T_1)] \quad (5.2)$$

先行車、追従車2台の車両が初期状態で車間距離 $s_0=20[m]$ 、等速度 $v_0=40[km/hr]$ で走行している状況を考えよう。この状態から先行車が等加速度で加速、または減速したのち、等速度走行に移るものとする。追従車の反応として相対速度モデル(5.2)を仮定したとき、反応感度 α とタイムラグ T_1 をパラメータとして、追従車の走行状態はどのように推移するであろうか。

加速のケースでは加速度 $a=1.0[m/sec^2]$ を $t_a=5[sec]$ 行ったら、速度 $V_1=58[km/hr]$ で、減速のケースでは減速度 $a=-1.0[m/sec^2]$ を $t_a=5[sec]$ 行ったら、速度 $V_1=22[km/hr]$ で、等速度走行に移るとしてシミュレーションを試行する。

パラメータの反応感度 α とタイムラグ T_1 は、表5.1の結果を参考にそれぞれ反応感度 α を0.5と1.0 $[sec^{-1}]$ の2通り、タイムラグ T_1 を0.5と1.0 $[sec]$ の2通りを代表として変化させることにする。

図5.1はシミュレーションの結果を車間距離-走行速度の平面上の軌跡としてあらわしたものである。図5.1(a)は反応感度 $\alpha=0.5$ のケース、図5.1(b)は反応感度 $\alpha=1.0$

のケースである。これらと比較すると、反応感度 α が大きい方が車間距離の変化に対する速度の変化が大きいために軌跡の傾きが緩く、またタイムラグ T_1 が大きいと、軌跡が膨らんでくる。

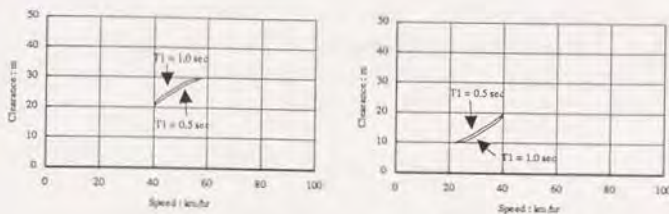


図5.1(a) 相対速度モデルのシミュレーション結果
(反応感度 $\alpha=0.5$ 、加速と減速のケース)

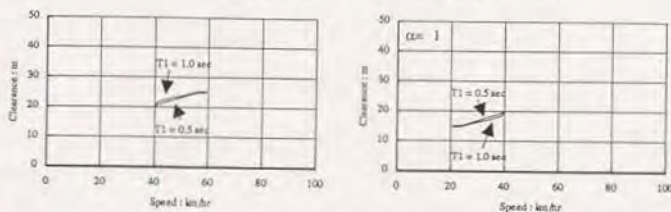


図5.1(b) 相対速度モデルのシミュレーション結果
(反応感度 $\alpha=1.0$ 、加速と減速のケース)

この結果の意味するところを考察してみる。式(5.2)の形からわかるように相対速度モデルの反応感度である α は、反応加速度と相対速度との比である。このモデル(5.2)ではタイムラグ T_1 が一定と考えているから、相対速度と反応加速度とは、タイムラグを介しながら相似に変化する。したがって反応感度 α とは、追従車両の状態が車間距離—走行速度の平面上を移動する傾きを表すことになる。そしてタイムラグが短いほど車間距離—走行速度平面上の追従車の状態は直線的に推移するのである。

表(5.1)に示したXingによって推定されたパラメータ群のうち、相対速度に関する T_1 と α を吟味してみると、 α は0.05から2.4程度までの範囲に分布している。一方 T_1 は多くの車両で1秒以下である。シミュレーションの結果を考えると、各車両の車間距離—走行速度平面上の走行状況は各々推定された α に応じた傾きで推移することになるはずである。したがって4.2で分析したように、実測された車間距離—走行速度関係が必ずしも直線関係ではないこと、また反応感度が加速減速の状況や、車間距離や走行速度に依存するらしいという結果を考えると、反応感度 α が定数であると仮定するのは構造上妥当とはいえないだろう。

5.1.2 希望する車間距離からの偏差への反応の特性

式(5.1)で記述される追従モデルの第2項は、希望する車間距離からの偏差へ反応する加速度である。ここで希望する車間距離からの偏差への反応と記述したモデル(5.3)の特性についても、同様の簡単なシミュレーションで検討する。

$$\dot{V}_F(t) = \beta \cdot [S(t - T_2) - f(V_F(t - T_2))] \quad (5.3)$$

先行車の走行条件は、先の相対速度モデルの場合と同様に、加速ケースと減速ケースの2通りである。走行速度の関数である希望車間距離はこれまでの観測事例を参考に、初期状態で希望車間距離であることを条件に以下のようにであると仮定することにする。

$$f(V_F) = 0.00007 \cdot V_F^3 - 0.007 \cdot V_F^2 + 0.6 \cdot V_F + 2.72 \quad (5.4)$$

パラメータの反応感度 β とタイムラグ T_2 は、表5.1の結果を参考に、それぞれ反応感度 β を $0.1[m \cdot sec^{-2}]$ 、タイムラグ T_2 を $1.0[sec]$ とする。

図5.2はシミュレーションの結果を車間距離-走行速度の平面上の軌跡としてあらわしたものである。左側が加速のケース、右側が減速のケースである。右上がりの曲線は、式(5.4)で定義された速度に応じた希望する車間距離である。この軌跡は、第4章で観測データから見たような追従走行車両の軌跡とは様相が異なっている。また、減速時は追突を生じている。車間距離の偏差に反応する第2項のみで追従挙動を記述するのは困難ということがわかる。追従走行時の加速度に主に貢献するのは第1項であり、第2項は補助的な役割を果たしているのである。

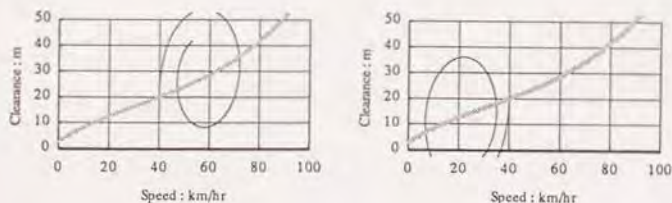


図5.2 車間距離偏差モデルのシミュレーション結果
(加速と減速のケース)

以上の検討をまとめると、表(5.1)に表れたパラメータのばらつきは個人差のほか、パラメータ推定に使用された各車両の断片的な走行データにも依存しているものと考えられる。

Xingの研究でパラメータ推定に使用した各車両の走行データは、ビデオカメラで捉えた約300m区間の範囲の状況である。したがって、この観測区間内でたまたま弱い加減速操作ですんだ車両の走行データを基にしたパラメータは緩慢な操作として推定され、強い加減速を要した車両は敏感な操作としてパラメータが得られることになる。したがってある限られた走行条件に応じてパラメータが推定された車両について、追従する順番を入れ替えて走行条件を変えれば、モデルの構造上想定されていない状況には対応できずに簡単に追突が起こることも無理からぬことであるといえるだろう。

実用的な車両追従モデルとは、さまざまな走行状況に応じた挙動が表現されることをモデル構造として想定したモデルであることが必要である。また、あわせてモデルのキャリブレーションに際しては、運転者の直面するであろう広い範囲の走行局面を含んだデータを用いるべきであると言える。

5.2 提案モデル

5.2.1 その特徴と考え方

これから提案する追従走行モデルは、実際の自動車車両の追従走行挙動が十分に再現できることがまず第1条件である。十分に再現できるという意味は、第4章でみたような車間距離-走行速度で代表される挙動が実際の運転者の行動とよく合致すること、またさまざまな走行条件に対応でき、数キロメートルにわたる区間の交通現象が再現できる、ということである。

またモデルの形式上、追従ドライバーの挙動が分かりやすく記述されていることも特徴のひとつとする。したがって、ドライバーの速度調節行動を、アクセルペダルとブレーキペダルの操作と捉え、既存の多くのモデルと同様に追従走行車の加速度を記述するものとする。

GMモデルをはじめとする既往の研究例から、追従車の加速度と相対速度とは、1秒前後の時間遅れをもって非常に高い相関があることが解っている。前方車と近づきつつあれば減速し、前方車から遠ざかりつつあれば加速する、これによって前方車の速度に一致させて車間距離の変化を解消しようとする追従走行の基本操作と考えられる挙動である。本研究でもこの考え方を踏襲する。

実用的な追従走行モデルを考える上で、もうひとつ考慮すべきことは、前方車両との車間距離が一定、すなわち相対速度の無い状態においても、走行速度に応じた望ましい車間距離に近づけようとする行動である。これがなくては、初期速度が先行する車両に等しい追従車は車間距離に関係なくそのままの速度を維持することになり、実際の行動に合致しない。そこで、速度に応じた追従車の希望する車間距離が存在すると仮定し、これと実際の車間距離との偏差に応じた加減速挙動が存在すると考える。

さらに、相対速度のタイムラグが負となる場合に典型的に現れる、前方車の行動を予測してその行動にあわせようとする予測挙動を想定し、この挙動を間接的な記述で補正項として取り入れることにする。

すなわち、速度を制御して前方車との相対速度をゼロに保とうとするGMタイプのモデルを一歩進め、越のモデルで提案された、走行速度に応じて望ましいと判断する車間距離に近づけようとする制御と、さらに前方車の次の行動を予測して、前方車の加減速にあわせようとする制御の総和を、追従走行挙動の基本構造であると考えることにする。

5.2.2 モデルの構造

ここでは提案する追従走行モデルを構成する各項について個別に検討し、全体像を明らかにする。

相対速度への反応項

前方車が接近している、または遠ざかりつつある、という相対速度が存在する場合に対応した加減速反応は、追従走行時の主要な挙動である。相対速度とは、車間距離の変化率であるが、これを運転者は前方車の大きさの変化率として捉えているものと考えられる。この項のモデル構造は式(5.5)のように仮定した。

式(5.5)の意味するところは以下の通りである。正または負の相対速度を認識し、これに応じた加速、または減速の行動として実現するまでのタイムラグ T_1 は一定値ではなく、走行状況に応じて変化するものであると考えているのである。タイムラグ T_1 を決定する要因としては、4.3で分析した結果から、もっとも貢献度合いが大きいと考えられる前方車の加速度の1次関数とし、この関数は加速時と減速時とで異なったパラメータ τ と p をとるものと仮定する。

さらに反応感度については、これも前章の分析結果を考慮して前方車との車間距離と自車の走行速度の関数とし、加速時と減速時とではパラメータ α 、 m 、 l を異にするものと仮定している。

$$\begin{aligned}\dot{V}_{Fi}(t+T_1^+) &= \alpha^+ \cdot \frac{[V_F(t)]^{m^+}}{[S(t)]^{l^+}} \cdot [V_L(t) - V_F(t)] \\ T_1^+ &= \tau^+ + p^+ \cdot \dot{V}_L(t)\end{aligned}\quad \text{加速時} \quad (5.5.a)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{Fi}(t+T_1^-) &= \alpha^- \cdot \frac{[V_F(t)]^{m^-}}{[S(t)]^{l^-}} \cdot [V_L(t) - V_F(t)] \\ T_1^- &= \tau^- + p^- \cdot \dot{V}_L(t)\end{aligned}\quad \text{減速時} \quad (5.5.b)$$

希望する車間距離からの偏差への反応項

まず、希望する車間距離が走行速度に対応して存在し、その関数形が3次式で記述できるものとする。このうえで走行速度に応じた希望する車間距離からの偏差に反応する加減速行動は、式(5.6)のようにモデル化する。

運転者による車間距離の把握は、前方車そのものの大きさや前方車との車間距離

に相当する路面の見かけの大きさから視覚を利用して行っているものと考えられる。したがって、視覚から認知され得る車間距離の偏差は、車間距離が大きくなれば、同じ偏差であっても認知される際の感度は低下するものであろう。したがって、反応感度は車間距離に逆比例する関数であると考えられる。

車間距離の認知そのものは、視覚によって瞬時になされるものであろうが、これが希望する車間距離と比較して偏差があると判断してから、運転者の加減速の操作行動を経て実際に車両の加減速として実現するには、やはり若干のタイムラグ T_2 があると考えられる。この行動から実現へのタイムラグ T_2 については、計測する方法がないため、1秒程度の一定値であるものと仮定する。

$$\dot{V}_{F2}(t+T_2) = \beta \cdot \frac{1}{[S(t)]^n} \cdot (S(t) - f[V_F(t)])$$

$$f(V_F) = a_3 V_F^3 + a_2 V_F^2 + a_1 V_F + a_0 \quad (5.6)$$

前方車の行動にあわせる補正項

自動車運転者が追従走行時に前方を見ながら利用する情報は、前方車の走行状況のみとは限らない。我々が追従運転するときには、前方車の次の行動を予測しながら操作しているものである。前方車の加減速を予測した追従車の挙動の構造は明らかではないが、結果として、前方車の加減速にあわせようとする挙動として実現するものと考えられる。そしてこの挙動は車間距離が小さいときほど感度が大きく、車間距離が大きい場合には逆に感度が小さいであろう。

そこで、前方車の走行結果への単純な反応である上記2つの項によって記述しきれない挙動を補正する位置づけとして、式(5.7)を付加することにする。式(5.7)のモデル構造は間接的な補正項であるが、前方車の加速度に一定値のタイムラグ T_3 で対応するものと仮定する。

$$\dot{V}_{F3}(t+T_3) = \delta \cdot \frac{1}{[S(t)]^n} \cdot \dot{V}_L(t) \quad (5.7)$$

以上のことから、追従走行モデルは3つの項の総和として、以下のような形式であるとする。

$$\dot{V}_F(t) = \dot{V}_{F1}(t) + \dot{V}_{F2}(t) + \dot{V}_{F3}(t) \quad (5.8)$$

5.3 追従走行モデルのパラメータ推定

5.3.1 推定の方法

前節で提示した追従走行モデル(5.8)の構造は多数のパラメータを有する。これらすべてのパラメータを一挙に求めることはむずかしい。そこでこれらパラメータ群の推定は、以下のような3段階を順次踏んで絞り込んでゆくことにする。

推定においては、追従走行実験における5人の被験者の昼と夜の20~30分間の追従走行から得られた先行車と追従車の速度、加速度、車間距離の時系列データを5分間ごとに分割して使用する。この推定結果からパラメータの個人差や個人内のばらつきを後で検討する。

1) 相対速度モデルによる第1次推定

第1段階ではまず相対速度を要因とする、式(5.5.a)及び(5.5.b)によって加減速挙動が記述できると仮定し、パラメータの一部を推定する。この時得られるパラメータは追従走行モデルの仮説からいえば、希望する車間距離からの偏差に応じた加減速挙動の項とその他の補正項を取り除いた形である。

モデル式(5.5.a)および(5.5.b)は、先行車の走行速度と加速度、追従車の走行速度、車間距離の走行状況データの時系列が与えられれば、追従車の加速度を出力できる構造である。そこで、実測された走行状況データをもとにモデルから出力される加速度と、実際に観測された追従車の加速度とを比較し、もっとも偏差の小さいパラメータの組み合わせを推定しようとするのである。

パラメータ推定の目的関数は、モデルによって算出される追従車両の加速度と、実際に観測された加速度との偏差である。そして推定されるパラメータは、加速時、減速時とも、 α , m , l , τ , p の各5個の計10個である。またこれら10個のパラメータはおおよそその値が経験的にわかっている。すなわちそれぞれの絶対値は高々3以下である。そこでこの範囲でランダムな初期値を設定して推定計算を実施する。

2) 全体モデルによる第2次推定

次に相対速度モデルを仮定して推定されたパラメータの組み合わせを初期値として、追従走行モデル全体のパラメータ推定を行う。この時に推定するパラメータは追従車の加速度をモデル式(5.8)で記述したものである。パラメータは a_3 , a_2 , a_1 , a_0 の4個、また希望車間距離からの偏差に反応するタイムラグ T_2 、反応感度 β と n の3個、さらに前方車の加減速にあわせる項のタイムラグ T_3 、および感度 δ と h の3個と、以上の10個を加えた、計20個である。

パラメータ推定の目的関数は、第1次推定と同様にモデルによって算出される追従車両の加速度と実際に観測された加速度との偏差とし、これを最小とするパラメータの組み合わせが求められるものとなる。

3) 全体モデルによる最終推定

最後に第2次推定で得られたパラメータを初期値として、再度追従モデル全体のパラメータ推定を行う。パラメータ推定の目的関数は、追従走行モデルによって出力される加速度で追従車の走行シミュレーションを実施し、シミュレーション時間内にわたる車間距離に実測値と計算値との偏差とする。具体的には、実験で計測された先行車両の走行データのみを与え、追従走行モデル(5.8)と仮定したパラメータのセットを用いて追従車の走行挙動のシミュレートを行い、観測された追従車の走行挙動との合致度が高いパラメータのセットを探索する方法とする。これは追従車の挙動を模擬し、現実で計測された車間距離-走行速度関係を十分に再現できる追従走行モデルを求めることをねらいとするためである。

以上の3段階の推定計算は、同定すべきモデルは非線形であるから、それぞれの目的関数を最小化するパラメータを求める非線形最適化問題となる。非線形最適化問題を解くアルゴリズムは多種多様なものがあるが、この問題の目的関数は、その勾配を求めることは容易ではない。そこで、目的関数の勾配の計算を要しないシンプレックス法を採用することにした。

シンプレックス法とは n 個の独立変数によって定められる n 次元空間において、ある試行点から次の試行点を系統的に求めるアルゴリズムと、制約条件を満たすように試行点を修正する手順によって最適な n 個の変数の組を探索する手法⁴⁾である。

この方法の考え方は、設定したパラメータから構成されるシンプレックスの頂点をその中で最悪の目的関数値をとる最悪点とそれ以外の点とに分け、最悪点以外の点から構成される図形の図心に関する最悪点の鏡映点は、元の点よりも目的関数値を改善することが期待できる、というものである。モデルのパラメータは互いに必ずしも独立とは限らないが、この方法が実用的であることから採用することにする。

5.3.2 推定の結果

3段階の推定プロセスから最終的に得られたパラメータは、表5.2のとおりである。表5.2(a)は昼間の走行データ、表5.2(b)は夜間の走行データから推定された結果である。データを5分間ずつ区切って推定計算を実行しているため、各運転者に対して3～5セットのパラメータが得られている。

表5.2(a) 追従走行実験の5人の被験者のモデルパラメータ(昼間のケース)

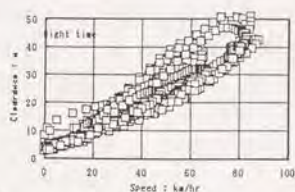
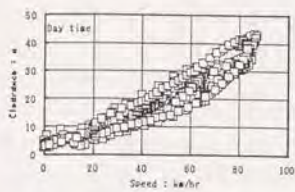
	$\alpha+$	$m+$	$l+$	$\tau+$	$p+$	$\alpha-$	$m-$	$l-$	$\tau-$	$p-$	$\alpha3$	$\alpha2$	$\alpha1$	$\alpha0$	β	n	$T2$	δ $\times 10$	h	$T3$
Day time																				
Driver A																				
1.55	-0.06	0.24	1.41	-0.18	1.42	0.72	0.98	1.38	0.63	0.50	-0.47	0.51	0.29	0.20	0.98	0.87	0.31	1.28	0.81	
1.46	-0.07	0.26	1.46	-0.21	1.32	0.72	1.00	1.37	0.61	0.50	-0.48	0.51	0.29	0.21	0.95	0.85	0.32	1.21	0.85	
1.48	-0.05	0.20	1.51	-0.24	1.19	0.77	1.05	1.33	0.59	0.50	-0.49	0.51	0.31	0.20	0.89	0.85	0.35	1.18	1.01	
1.07	-0.06	0.39	1.71	-0.33	0.89	0.77	1.10	1.43	0.51	0.51	-0.51	0.46	0.29	0.24	0.77	0.81	0.36	0.75	1.02	
1.18	-0.04	0.31	1.50	-0.29	1.07	0.77	1.06	1.35	0.51	0.50	-0.49	0.48	0.30	0.13	0.92	0.84	0.38	0.77	1.05	
Driver B																				
1.25	0.05	0.24	1.53	-0.26	1.32	0.82	1.01	1.52	0.69	0.50	-0.49	0.50	0.31	0.31	0.72	0.99	0.36	0.99	0.81	
1.36	-0.04	0.27	1.47	-0.23	1.35	0.75	0.97	1.40	0.65	0.50	-0.47	0.49	0.30	0.25	0.94	0.89	0.34	1.12	0.86	
1.29	-0.02	0.29	1.49	-0.25	1.37	0.77	0.97	1.46	0.68	0.50	-0.48	0.49	0.31	0.27	0.82	0.92	0.36	1.00	0.88	
1.20	-0.01	0.30	1.53	-0.26	1.42	0.77	0.97	1.53	0.73	0.51	-0.49	0.49	0.31	0.27	0.78	1.00	0.37	1.06	0.67	
1.31	-0.09	0.22	1.51	-0.28	1.25	0.80	1.06	1.36	0.58	0.51	-0.51	0.52	0.36	0.30	0.75	0.89	0.41	0.97	1.07	
Driver C																				
1.23	-0.01	0.36	1.58	-0.28	1.29	0.78	1.05	1.50	0.61	0.50	-0.53	0.55	0.30	0.28	0.68	0.92	0.33	0.97	0.68	
1.27	-0.01	0.27	1.55	-0.21	1.57	0.77	0.90	1.57	0.77	0.49	-0.47	0.53	0.30	0.32	0.95	0.95	0.32	1.16	0.71	
1.36	-0.03	0.39	1.62	-0.25	1.42	0.75	0.95	1.58	0.74	0.49	-0.50	0.53	0.29	0.33	0.77	0.96	0.31	1.12	0.52	
Driver D																				
1.33	0.02	0.28	1.43	-0.23	1.47	0.82	0.99	1.48	0.65	0.50	-0.49	0.53	0.33	0.29	0.90	1.00	0.40	1.02	0.74	
1.43	0.06	0.29	1.41	-0.19	1.75	0.83	0.92	1.61	0.72	0.48	-0.45	0.49	0.33	0.35	0.66	1.04	0.31	1.07	0.58	
1.23	-0.06	0.34	1.56	-0.28	1.18	0.78	1.04	1.45	0.59	0.49	-0.51	0.54	0.30	0.26	0.79	0.89	0.35	0.97	0.82	
1.31	0.01	0.28	1.51	-0.24	1.39	0.77	0.96	1.49	0.70	0.49	-0.47	0.50	0.31	0.31	0.86	0.91	0.35	1.05	0.80	
1.36	-0.02	0.34	1.52	-0.21	1.52	0.73	0.91	1.52	0.70	0.49	-0.46	0.52	0.30	0.25	0.96	0.95	0.32	1.04	0.71	
Driver E																				
1.44	-0.04	0.27	1.53	-0.23	1.31	0.73	1.01	1.45	0.65	0.49	-0.49	0.52	0.29	0.26	0.86	0.91	0.32	1.15	0.75	
1.43	-0.05	0.29	1.54	-0.23	1.34	0.72	0.98	1.49	0.68	0.49	-0.49	0.51	0.30	0.27	0.82	0.92	0.33	1.15	0.75	
1.34	-0.05	0.27	1.47	-0.23	1.30	0.74	0.99	1.38	0.62	0.50	-0.48	0.50	0.30	0.21	0.94	0.87	0.34	1.06	0.93	
1.13	-0.04	0.36	1.59	-0.29	1.12	0.79	1.05	1.45	0.56	0.50	-0.51	0.52	0.30	0.26	0.79	0.89	0.36	0.87	0.85	
1.25	0.00	0.29	1.54	-0.23	1.29	0.75	1.00	1.41	0.63	0.49	-0.47	0.50	0.29	0.21	1.00	0.86	0.35	1.03	0.73	

表5.2(b) 追従走行実験の5人の被験者のモデルパラメータ(夜間のケース)

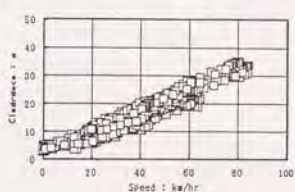
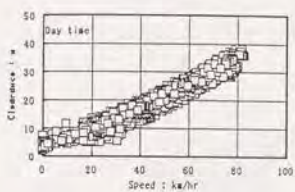
	α^+	m^+	l^+	τ^+	p^+	α^-	m^-	l^-	τ^-	p^-	a_3	a_2	a_1	a_0 $\times 10$	β	n	T_2	δ $\times 10$	h	T_3
Night time																				
Driver A																				
1.30	-0.03	0.34	0.26	1.46	-0.20	1.48	0.77	0.96	1.46	0.68	0.49	-0.46	0.51	0.31	0.21	0.94	0.99	0.36	1.02	0.81
1.35	-0.06	0.38	0.30	1.63	-0.27	1.28	0.74	0.99	1.56	0.69	0.48	-0.50	0.55	0.29	0.36	0.70	0.93	0.33	1.09	0.52
1.29	-0.07	0.39	0.32	1.64	-0.27	1.32	0.72	0.97	1.56	0.72	0.48	-0.50	0.54	0.28	0.34	0.74	0.96	0.32	1.11	0.51
1.35	-0.10	0.35	0.25	1.62	-0.28	1.25	0.73	1.00	1.48	0.67	0.49	-0.51	0.54	0.30	0.31	0.78	0.91	0.34	1.10	0.68
Driver B																				
1.44	0.00	0.26	0.26	1.46	-0.20	1.48	0.77	0.96	1.46	0.68	0.49	-0.46	0.50	0.30	0.26	0.91	0.91	0.32	1.17	0.77
1.37	-0.04	0.20	0.20	1.39	-0.22	1.33	0.81	0.98	1.40	0.67	0.48	-0.45	0.49	0.32	0.20	1.01	0.91	0.40	1.06	1.06
1.47	-0.07	0.32	0.32	1.54	-0.23	1.39	0.72	0.96	1.52	0.72	0.48	-0.49	0.53	0.29	0.30	0.82	0.93	0.31	1.21	0.61
1.40	-0.02	0.25	0.25	1.43	-0.22	1.44	0.78	0.97	1.44	0.67	0.50	-0.48	0.50	0.32	0.26	0.84	0.92	0.35	1.09	0.89
Driver C																				
1.28	-0.11	0.37	0.37	1.60	-0.27	1.29	0.68	0.99	1.47	0.66	0.50	-0.51	0.52	0.30	0.28	0.81	0.90	0.36	1.13	0.70
1.19	-0.15	0.41	0.41	1.69	-0.32	1.13	0.69	1.03	1.45	0.63	0.50	-0.53	0.54	0.29	0.31	0.79	0.86	0.34	1.03	0.66
1.22	-0.10	0.43	0.43	1.69	-0.28	1.26	0.69	0.98	1.59	0.71	0.48	-0.51	0.54	0.26	0.35	0.75	0.93	0.29	1.10	0.50
1.27	-0.18	0.44	0.44	1.44	-0.27	1.41	0.75	0.91	1.54	0.64	0.51	-0.49	0.49	0.30	0.25	0.76	1.03	0.33	1.00	0.94
Driver D																				
1.20	-0.02	0.36	0.36	1.58	-0.27	1.27	0.79	1.01	1.55	0.59	0.50	-0.50	0.47	0.29	0.31	0.71	0.94	0.35	0.90	0.70
1.50	-0.04	0.25	0.25	1.41	-0.18	1.47	0.74	0.96	1.40	0.66	0.50	-0.47	0.51	0.30	0.21	0.97	0.92	0.33	1.23	0.81
1.34	0.00	0.25	0.25	1.40	-0.21	1.35	0.77	1.00	1.37	0.57	0.51	-0.47	0.48	0.31	0.15	1.01	0.88	0.37	1.01	0.99
1.19	-0.03	0.29	0.29	1.53	-0.25	1.38	0.73	0.97	1.47	0.69	0.51	-0.48	0.50	0.30	0.21	0.96	0.95	0.35	1.03	0.76
1.20	0.01	0.30	0.30	1.60	-0.26	1.30	0.76	1.01	1.59	0.67	0.49	-0.51	0.52	0.29	0.39	0.68	0.96	0.33	1.01	0.54
Driver E																				
1.10	-0.05	0.41	0.41	1.59	-0.29	1.25	0.76	0.97	1.49	0.64	0.50	-0.50	0.51	0.28	0.21	0.89	0.93	0.37	0.88	0.73
1.24	-0.03	0.31	0.31	1.53	-0.25	1.31	0.78	1.00	1.45	0.61	0.50	-0.49	0.52	0.31	0.27	0.82	0.91	0.36	0.96	0.84
1.29	-0.13	0.35	0.35	1.60	-0.26	1.27	0.77	0.98	1.45	0.65	0.49	-0.51	0.53	0.31	0.21	0.84	0.93	0.36	1.10	0.75
1.36	-0.05	0.32	0.32	1.51	-0.25	1.15	0.76	1.02	1.41	0.59	0.49	-0.49	0.52	0.28	0.21	0.95	0.85	0.33	1.09	0.87

これらの最終的に得られたパラメータを用いて各被験者の追従挙動をシミュレートした結果を1秒毎の車間距離と走行速度の関係としてプロットしたものが図5.3である。シミュレーションでは先行車の走行条件については、観測データをそのまま用いている。追従車は式(5.8)のモデル式と表5.2のパラメータのセットを5分間ごとに入れ替えて用い、追従走行の全行程の再現を試みている。

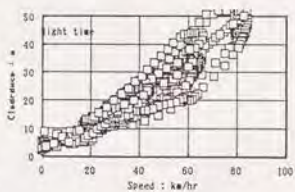
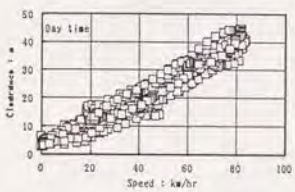
図5.3は、5人の運転者の実際の追従挙動を車間距離-走行速度平面上にプロットした図4.4に対応する。そこで、追従走行挙動の実測結果と再現結果を5人の運転者について比較してみると、各運転者の車間距離-走行速度関係はおおむね合致しており、速度に応じた車間距離の調節に関して個人差をある程度反映できていると言えよう。ただし、図4.4に示した実際の運転者の挙動では、運転者Bを例外として、走行速度に対する車間距離は高速になるにつれて幅がひろがっているが、これに比較して図5.3に示したモデルによる追従走行の再現結果では変動幅が小さい。追従走行モデルでは忠実になおかつ機敏に加減速を行っているために、車間距離のぶれが小さいものと考えられる。この理由は、今回提案した追従走行モデルは実際の運転者の加減速操作のランダム性を記述しておらず、決定論的な構造をとっているためである。この点は提案したモデルの記述できる限界であるといえるであろう。



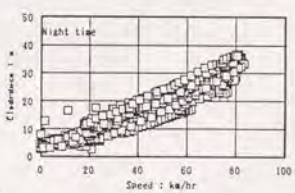
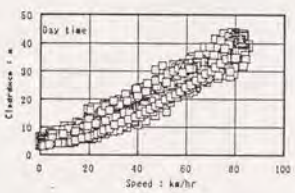
運転者 A



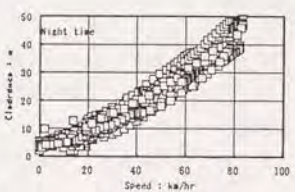
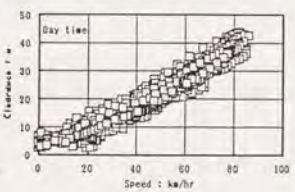
運転者 B



運転者 C



運転者 D



運転者 E

図5.3 シミュレーションによる5人の運転者の車間距離-走行速度関係
(昼間および夜間のケース)

次に、ひとりひとりの運転者の昼間と夜間の走行実験から5分間毎に推定された各パラメータセット間に見られる変動の感度評価を試みる。一例として運転者Aの夜間の走行データから推定された4つのセットのパラメータを用いて、同じ運転者Aの昼間の走行実験時の先行車に追従走行させるシミュレーションを行った。この結果から昼間と夜間の追従挙動パラメータの変動の感度と、5分毎に推定されたパラメータセット間の変動による感度をあわせて評価することにする。

シミュレーションの結果を図5.4に示す。これらの図も車間距離-走行速度の平面上に追従走行の状況をプロットしたものである。左上の図から夜間の第1番目のパラメータセット、第2番目のパラメータセット、…の順に示されている。

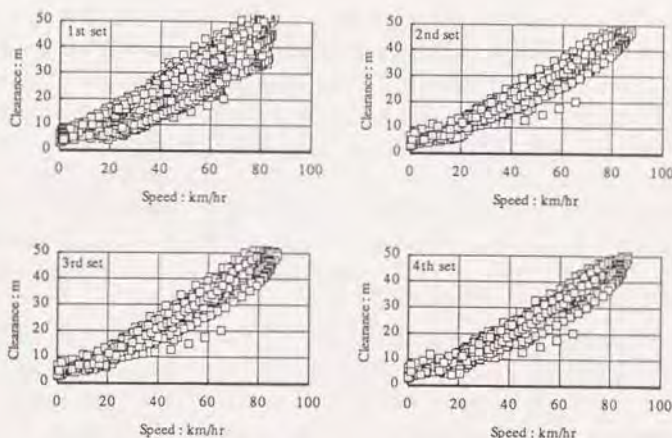


図5.4 運転者Aの夜間走行のパラメータによる昼間の先行車への追従走行結果

図5.4と図5.3に示した運転者Aの追従走行の再現結果とを比較してみよう。これによれば、夜間の走行から推定されたパラメータによるシミュレーションの方が、先行車の走行条件によらず、どのケースも同じ走行速度でやや広い車間距離をとる特徴があらわれている。また図5.4の4つのセット間の比較では、ひとつひとつのパラメータ値には多少の変動があるものの、パラメータ全体としては運転者A個人の追従挙動の特徴をあらわす類似した結果となることがわかる。

第6章 サグの隘路現象の再現

6.1 縦断勾配の追従走行挙動への影響

道路の縦断勾配そのものやその変化が、自動車車両のダイナミックな走行動態にどのように影響するかに関して、これまで定量的な評価が成された事例は見あたらない。しかし、高速道路のさまざまなサグ地点において隘路現象が発生している事実から考えて、サグという道路構造の特徴である、走行して行くにつれて縦断勾配が増加方向に変化してゆく効果が影響していることは疑いのないところであろう。

では、縦断勾配の車両の走行に対する効果はいったいどのようなものであろうか。ここでも縦断勾配の大きさを、上り勾配を正值と定義して考えてみる。単純に言えば、プラス勾配である上り坂においては、走行に抵抗する重力成分が車両に働き、マイナス勾配である下り坂では、車両を加速する方向の重力成分が働くことになる。

ならば一定の勾配が続く道路区間を走行している車両は、車両に働く重力成分に応じて速度の変化が続くだろうか。たとえば、上り坂では車両の速度は低下を続け、下り坂では速度が上昇し続けるだろうか。現実はそのようではない。車両の駆動能力に比較して緩やかな一定勾配の上り坂や下り坂を走行してゆくにつれ、運転者は縦断勾配の影響を補償したアクセルペダルの操作に至ると考えて良いであろう。

では、サグやクレストのように、走行して行くにつれて縦断勾配が変化する区間に車両が進入した場合ではどうなるか。縦断勾配が変化し始めたときに、運転者がこの変化を認識できず、アクセルペダルの操作をそれまでと同様に保って変更しなければ、車両の走行速度は変化してゆくことになる。そして、この縦断勾配の変化を原因とした車両の走行速度の変化が顕在化してから、運転者が速度変化そのものを認知するか、あるいは速度変化にともなう前方車との車間距離に変化が生じ、それが望ましくない状態であると判断してはじめて、加減速のペダル操作によって速度調節を行うものと考えられる。

このように、自車両の走行速度や前方車との車間距離やその変化を加減速操作の主たる情報とする運転者にとって、縦断勾配の変化に対応しうる時点は、実際に走行している地点の縦断勾配に比べて常に遅れを持つものである。

これに対して、縦断勾配が変化することが運転者にとって視覚から容易に認識できるものであれば、勾配変化による走行速度の変化が実現しないうちにあらかじめ加減速のペダル操作をすることも可能である。このような場合には、縦断勾配への対応の遅れは勾配が認識できない場合に比較して、小さいはずである。視認しやすいサグが隘路とはならないという事実は、この理由から定性的に説明することがで

きるであらう。

さらに、東名高速道路の東京方向の秦野サブのように、縦断線形では-2.6%の下り勾配から-0.3%のさらに緩やかな下り勾配へ変化するサグ地点でも、隘路現象の常習地点となっている事実がある。したがって、サグの下流側がプラス勾配となる上り坂であることは、隘路現象を引き起こすための十分条件でもないといえるだろう。やはり、縦断勾配が増加方向に変化することが鍵なのである。

以上のことから、縦断線形がサグ構造であることが運転者にとって認識しにくい場合、サグの追従走行挙動への影響とは、縦断勾配が徐々にプラス方向に変化し、これにともなって走行抵抗が徐々にプラス方向に変化してゆくことに運転者が即時に対応できず、若干の遅れをもって補償せざるを得ない点にある、と考察される。

6.2 縦断勾配変化の影響の仮説と検証

6.2.1 影響のモデル化

前節で述べたように、縦断勾配が車両走行に及ぼす影響はその絶対量そのものではなく、その変化量が影響するものと考えられる。すなわち、一定の勾配区間が連続する場合には、運転者はその勾配の影響を補償して望ましい走行状況を保つように加減速のペダル操作に至っているものと考えるのである。そこで前章で提案した追従走行モデルに加わる影響としては、縦断勾配が変化する場合に補償対応の遅れる分が外力として車両に働くことと捉え、縦断勾配そのものを補償するアクセル等の加減速ペダルの踏み込み量を、明示的には記述しないことにする。

サグのように進行方向に縦断勾配が変化する区間において、縦断勾配の変化に気づかない運転者は平坦な道路における同様の追従走行挙動を行うことになるはずである。そして前方車との相対速度や、希望する車間距離からの偏差を解消しようと意図してペダルの操作をするときに、期待通りの調節ができなかった結果を修正する行動として、合わせて縦断勾配の補償行動をしていると見なすことにする。したがって、補償対応の遅れは数秒程度と考えられる。

そこで前章で提案した運転者の平坦路における追従走行挙動を記述するモデル(5.8)をベースとして、縦断勾配の補償対応は T_g 秒前に通過した地点の勾配までしかできず、実際に走行している地点の勾配への対応遅れが生じるものとモデル化し、式(6.1)のように定式化する。

$$g \cdot [\sin\theta(t) - \sin\theta(t - T_g)] \quad (6.1)$$

ここに、

g : 重力加速度

である。

この式で $\theta(t)$ とは、時刻 t において走行している地点の縦断勾配である。したがって式(6.1)の意味するところを整理すると、車両の進行方向の重力成分のうち、 T_g 秒前に通過した地点の勾配である。 $\theta(t-T_g)$ からの変化分が車両に働く、ということである。

以下では T_g は一定値であると仮定して、このようなモデル化がサグを隘路とする渋滞の安定した状況を再現しうるか、交通流のシミュレーション実験で確認する。

6.2.2 サグ区間における検証シミュレーション

シミュレーションの方法

シミュレーションにおいて想定する道路は、車線変更のない1車線道路で、途中にサグが存在する区間とする。区間長はサグの上流に10km、下流に20kmを確保する。ここで設定するサグは、観測データの整っている東名高速道路の秦野サグを念頭に置き、縦断勾配差を2.3%、縦断曲線長を500mとした道路構造を採用する。シミュレーション区間における勾配変化区間は、200m地点から700m地点の間である。

シミュレーションで入力する需要交通量は、東名高速道路の秦野サグにおいて観測で得られている渋滞安定時の平均速度と交通容量を参考とし、これより若干大きいフローレートの一様流とする。これは、交通容量に近い入力交通量とすれば、安定した渋滞状況に収束する時間がそれだけ早いであろうと考えられるからである。そこで第3章で示した秦野サグにおける観測事例を参考に、初期速度は30[km/hr]とし、入力交通量は渋滞安定時の交通容量が1300~1400[veh/hr/lane]であることから、1500[veh/hr/lane]程度とした。

シミュレーションでは、先頭車の走行条件を与え、2番目から後の車両は追従走行モデルによって前方車に追従して走行させるものとする。先頭車の走行条件は、時刻ゼロで地点0kmを初期速度で出発し、ある位置から等加速度で加速して自由流の走行速度まで到達した後に到達した速度を保つものとする。この加速度は、サグの隘路現象で観測される渋滞の先頭からの加速度である約 $0.1[m/s^2]$ よりも充分大きい $0.5[m/s^2]$ とする。先頭車の加速開始の地点と到達速度の条件は、いくつかのケースを実施して比較する。縦断勾配の対応遅れは5秒と仮定する。

追従走行モデルは式(5.8)で提案した構造である。ただし、追従走行実験に参加した5人の被験者と実際の道路を走行する一般の運転者とは、前方車に追従しようとする意欲の点で異なることが予想される。そこで、図4.3(a)に紹介した泰野サグにおいて渋滞安定後に観測された49人の運転者のデータを用いて、各車両のパラメータをあらためて推定した。この際、泰野サグで観測されたデータは300m足らずの区間の走行データであることを考慮し、走行実験の結果から得られた5人の運転者のモデルパラメータを初期値として計算を行い、追従走行モデルの構造の大枠が保たれるように配慮した。さらにシミュレーションの追従車には、これら49台の車両から推定されたパラメータの平均値を採用した。

このシミュレーションのねらいは3点ある。ひとつは、サグが交通容量の低い隘路となって安定した渋滞交通流が現れるか、という点である。2番目にはサグからの弱い加速構造が再現されるか、という点、さらに先頭車の条件を変えたとき、追従する車両の挙動が交通流全体で変化するものか、以上3項目が着目するポイントである。これらのねらいは、共に初期条件に依存することなくサグに隘路が停留し、ここからの弱い加速現象が定常的に継続するという、観測から得られているサグの隘路現象の特徴がシミュレーションでも再現されるか確認することである。

6.2.3 シミュレーションの結果

先頭車の加速開始位置の影響

図6.1の(a)、(b)、(c)はそれぞれ先頭車の加速後の到達速度を90[km/hr]とし、加速開始位置を縦断曲線の始点、中央部付近、終点よりさらに300m下流の3箇所に变化させた結果である。

図の横軸は30分間にわたる時間であり、縦軸は距離を表し、-3~7kmまでの10キロメートル区間にとっている。図中の右上がりの線は車両の走行軌跡である。この走行軌跡は追従車10台おきに描かれている。また、距離方向に1kmごとに記された数字は、追従車50台おきにその地点の通過速度を時速単位で示したものである。さらに図の中央部付近の1km地点に示された小さな文字の数字は、この地点を通過した車両の50台ごとの平均フローレートを1時間値に換算したものである。

シミュレーションを開始した20~30分後には、先頭車両の加速開始位置に関わらず、サグ地点の交通容量が1300~1400[veh/hr]程度で安定した状態に落ちついていることがわかる。

先頭車の加速後の到達速度の影響

図6.2の(a)、(b)、(c)は先頭車の加速地点を縦断曲線の起点とし、加速後の到達速度を60、90、120[km/hr]の3通りに変化させた結果である。これについても、先頭車両の加速後の到達速度に関わらず、サグ通過後の速度回復状況、サグの交通容量とも次第に安定した状態に落ちついていることがわかる。

以上のように、第5章で提案した追従走行モデルの構造と、これをもとにして渋滞継続中に観測された車両に関して推定された平均パラメータから、サグを安定的な隘路とする交通流が再現できることがわかった。この安定した状況は、先頭車の走行条件として、先頭車の加速開始位置、加速後の到達速度に依存しないことも明らかになった。すなわち、交通流の中に乱れが存在した場合でも、次第にサグが交通容量上の隘路として落ちついてしまうことが再現されたのである。

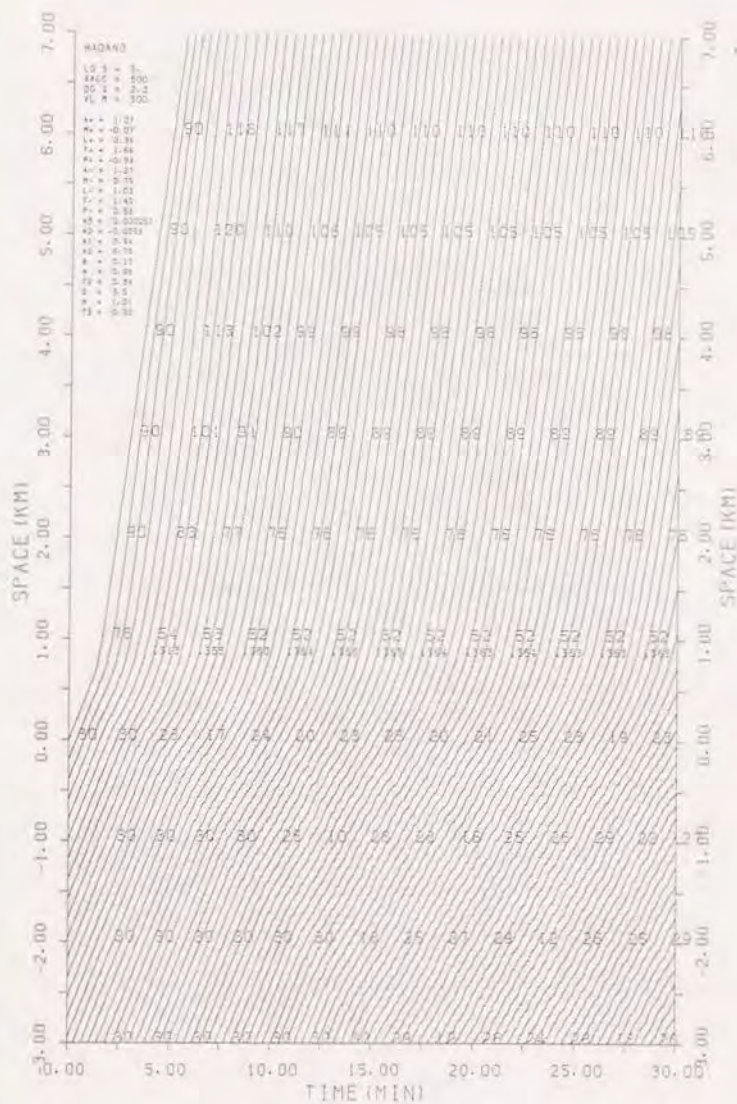


図6.1(b) 隘路現象シミュレーションの結果
(先頭車の加速位置=600m、縦断曲線の中央部付近、到達速度=90[km/hr])

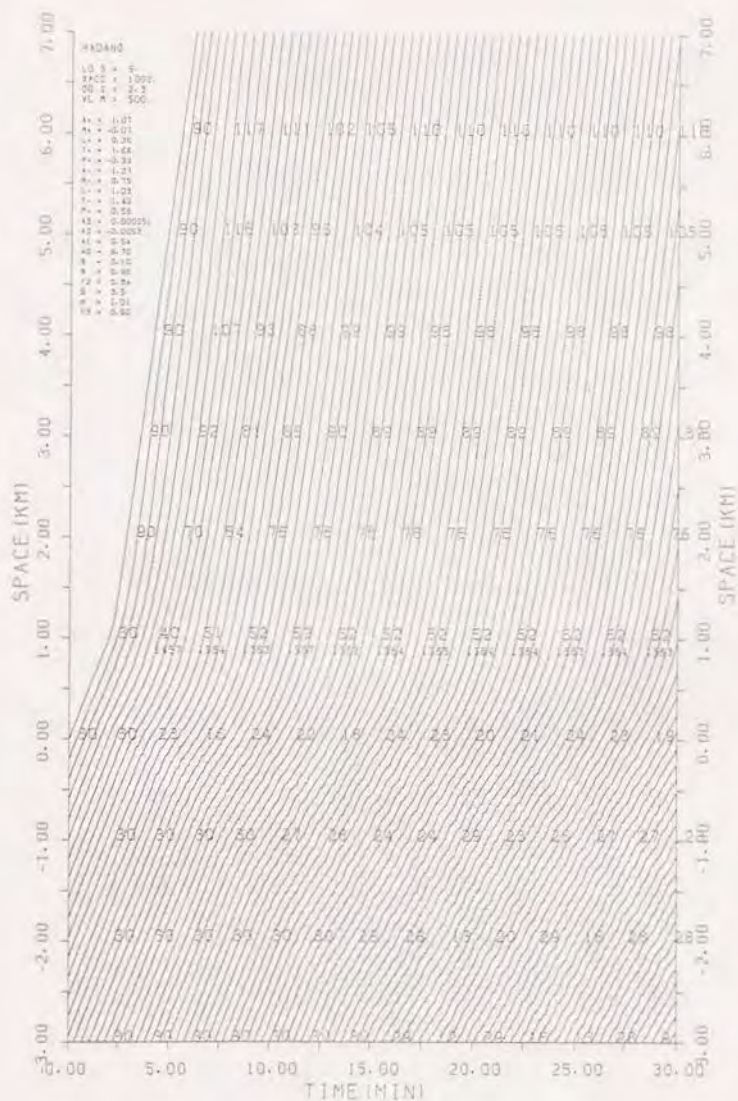


図6.1(c) 隘路現象シミュレーションの結果
(先頭車の加速位置=1000m、縦断曲線の終点下流、到達速度=90[km/hr])

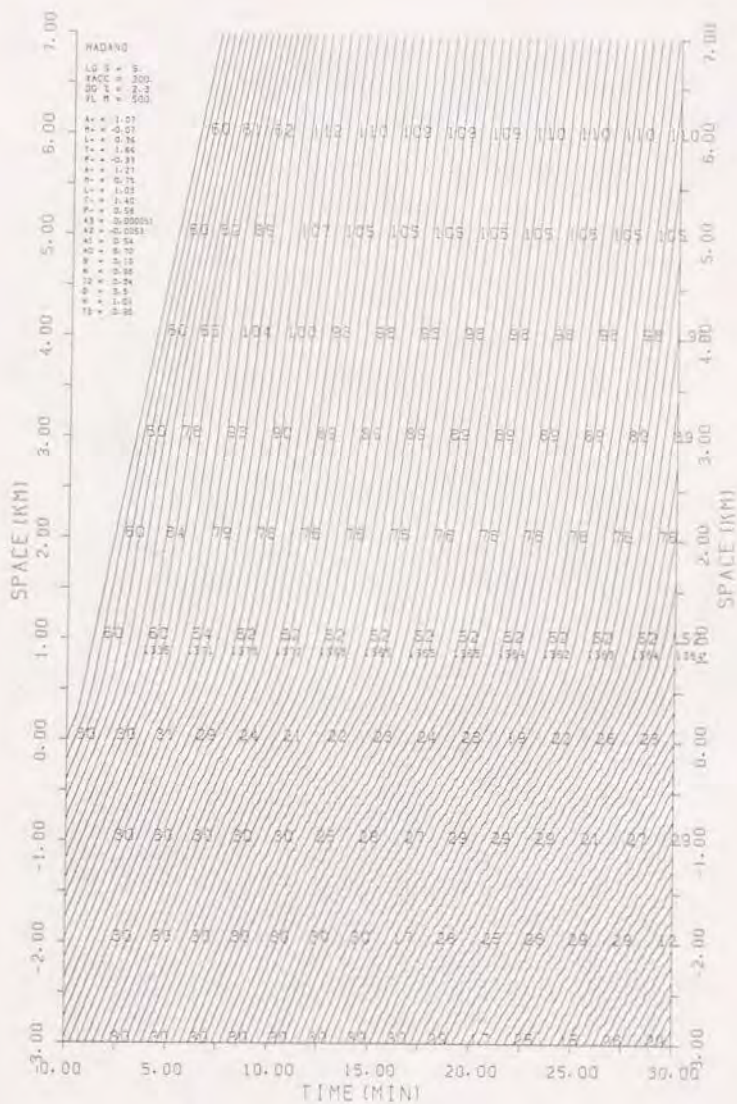


図6.2(a) 渋滞現象シミュレーションの結果
(先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、到達速度=60[km/hr])

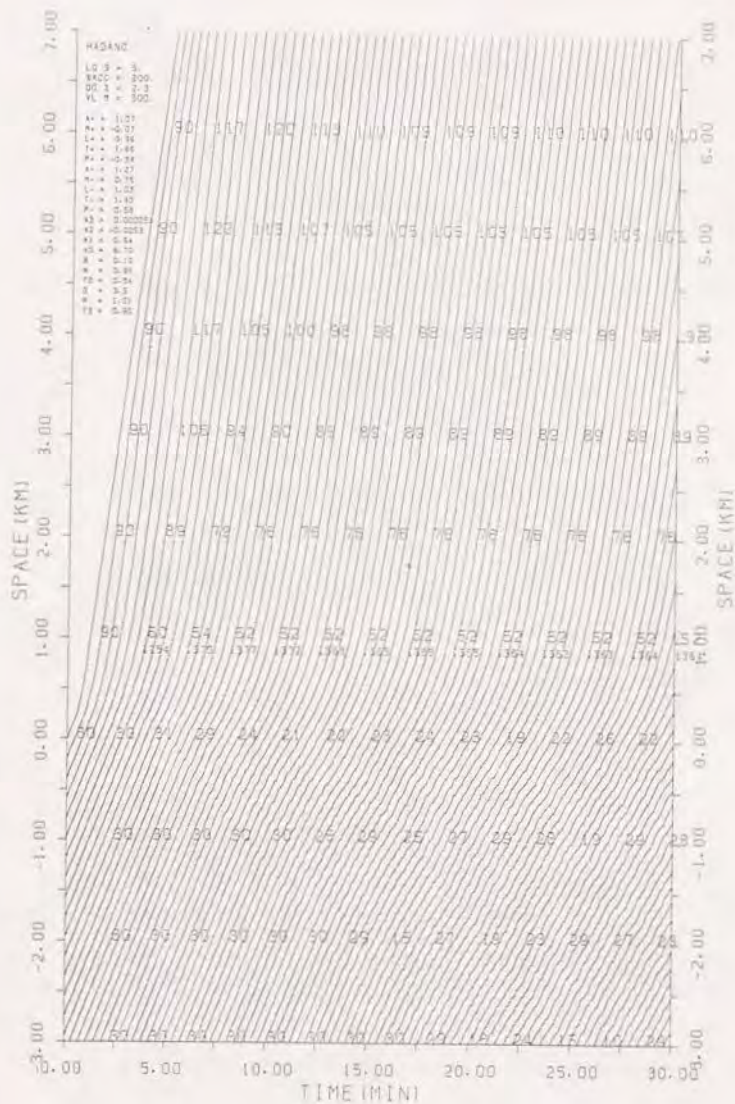


図6.2(b) 隘路現象シミュレーションの結果
(先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、到達速度=90[km/hr])

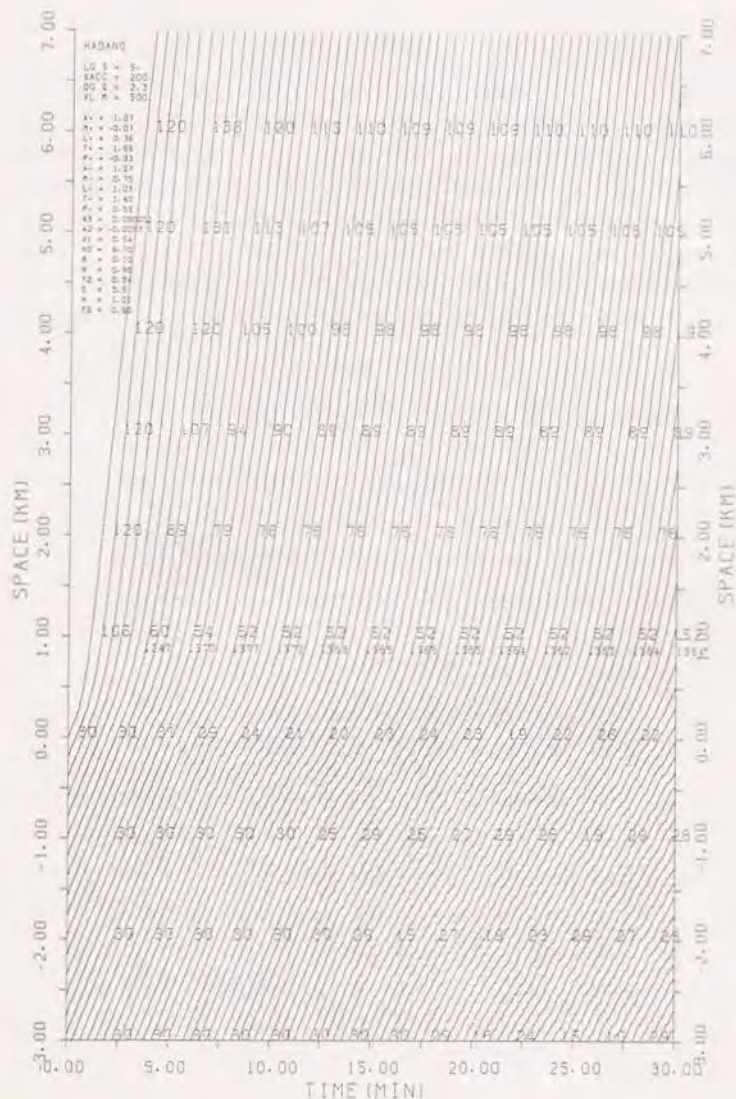


図6.2(c) 隘路現象シミュレーションの結果
(先頭車の加速位置=200m、縦断曲線の始点、到達速度=120[km/hr])

渋滞先頭からの加速状況

次に、渋滞現象の特徴のひとつである、渋滞からの速度回復プロファイルを見てみよう。図6.3と図6.4は500台目の追従車について、-3 km地点から7 km地点までの区間の地点通過速度の変動を示したものである。図6.3は図6.1に対応しており、先頭車の加速開始位置を変化させたケースである。図6.4は図6.2に対応し、先頭車の加速到達速度を変化させたケースである。図には先頭車の加速条件に応じた3ケースを重ねて描いている。両図を見ると、渋滞から速度を回復してゆく3ケースのプロファイルは判別できないほどに重なっている。このように、交通流の中に乱れが存在した場合でも、次第に安定した速度回復挙動に落ちついてゆくことがわかる。

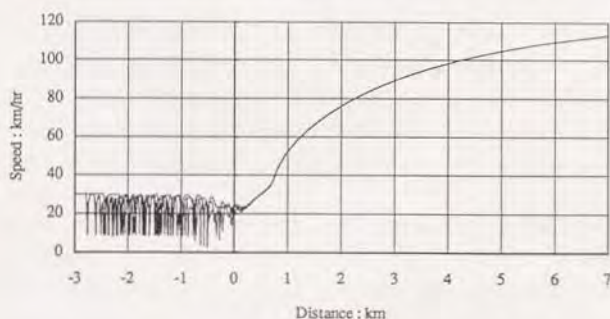


図6.3 500台目の追従車の速度変動プロファイル
(先頭車の加速開始位置を変化させたケース)

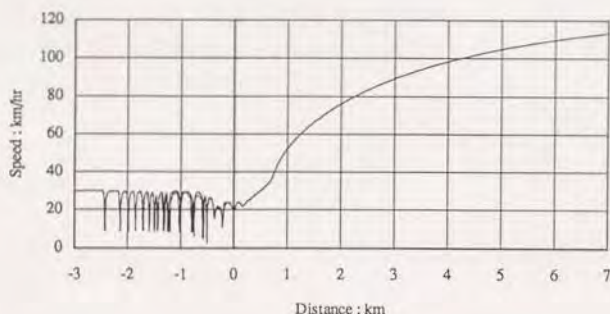


図6.4 500台目の追従車の速度変動プロファイル
(先頭車の加速後到達速度を変化させたケース)

また、隘路から90[km/hr]程度まで加速するのに2km程度を要しており、これも観測される現象をよく再現している。しかし、シミュレーション結果ではその後もさらに加速を続けている。この理由は、提案した追従走行モデルでは、運転者が希望する走行速度に達したときに加速を終了することを、構造として有していないためである。渋滞から抜け出た後は、運転者は前方車に追従するよりは、自分の望む速度で走行するという行動に重きをおくと想像されるが、今回のモデルではこの行動まで想定していない。これも、提案した追従走行モデルの限界のひとつであることが明らかになった。

6.3 平坦路、クレストにおける比較シミュレーション

前節では、サグにおける縦断勾配の変化の影響を式(6.1)のようにモデル化して隘路現象を再現しうることを明らかにした。このモデル化が縦断勾配がプラスに変化するという、サグ特有の構造においてのみ意味を持つのか、あるいは縦断勾配の変化がゼロである平坦路、およびサグとは逆に縦断勾配がマイナスに変化する構造であるクレストにおいても妥当な結果となるかを比較シミュレーションによって確認する。

シミュレーションでは、縦断勾配の変化を前節では泰野サグを想定して+2.3%と設定していた条件を、ここでは平坦路については0%、クレストについては-2.3%とし、その他の条件は同様とする。先頭車の加速開始地点は200m地点、加速後の到達速度は90[km/hr]とした。

図6.5は平坦路、図6.6はクレストを想定した結果である。これらの結果からは、サグのように縦断勾配の変化区間を隘路とした安定した状況には落ちつかず、追従車が初期速度から加速を開始する地点は上流に移動していることがわかる。すなわち入力した交通量よりも小さな交通容量となる隘路は存在していないのである。以上のように、縦断勾配の影響の仮説をモデル化した式(6.1)はサグ以外の構造においても妥当な結果となることが確認された。

図6.5 平坦路における比較シミュレーション

6.4 勾配変化の補償遅れ時間 T_g の評価

これまでのシミュレーションでは、勾配変化の補償遅れ時間 T_g は5秒であると仮定していた。勾配変化の影響をモデル化した式(6.1)によれば、縦断勾配の変化区間を走行する車両に働くものと仮定した外力は、 T_g に加え、時間 T_g で走行した道路区間の勾配変化量に比例する。すなわち T_g のほかに、縦断勾配差、縦断曲線長に依存することになる。この節では、再現される渋滞が安定した後のサグの交通容量に対するこれらの値の感度分析をシミュレーションによって実施する。

試行ケースは補償対応遅れ時間、縦断勾配差、縦断曲線長についてそれぞれ3通りのあわせて27ケース、さらに東名高速道路の秦野サグ、中央高速道路の中野サグのサグ構造についても比較のためそれぞれ補償対応遅れ時間に関して3ケースを実施した。表6.1はその結果である。表には縦断勾配差と縦断曲線長から近似的に算出した縦断曲線半径も併せて記載してある。

表6.1 サグの構造と縦断勾配変化への補償対応遅れの交通容量への影響

縦断勾配差 [%]	縦断曲線長 [m]	縦断曲線 半径 [m]	縦断勾配変化への補償対応遅れ		
			$T_g=3$ 秒 [veh/hr]	$T_g=5$ 秒 [veh/hr]	$T_g=7$ 秒 [veh/hr]
2	400	20000	1430	1360	1305
2	800	40000	1500	1450	1410
2	1200	60000	1540	1500	1470
4	400	10000	1330	1240	1170
4	800	20000	1440	1340	1260
4	1200	30000	1480	1420	1470
6	400	6700	1260	1150	1070
6	800	13300	1360	1240	1150
6	1200	20000	1440	1340	1240
2.3	500	21700	1440	1360	1305 (秦野サグ)
6.9	800	11600	1330	1210	1110 (中野サグ)

渋滞安定後のサグの交通容量は、ほぼ実際に観測されている1300~1400[veh/hr]程度の範囲に入っており、縦断勾配変化の対応遅れを5秒程度としたことは妥当であることがわかる。交通容量の変化を詳細にみると、縦断勾配差が小さいほど、また縦断曲線長が長いほど、すなわち補償対応遅れ時間で走行する距離当りの縦断勾配の変化が小さいケースほど、高い値を示している。これに対してこれまでのいくつかのサグ地点における観測結果からは、渋滞安定後の隘路の交通容量は線形にはほとんど依存していないと言われている。

この事実の説明としては、縦断勾配の変化が緩やかな構造であるほど、縦断勾配の増加方向の変化にともなう走行抵抗の変化によって、運転者が認識できる速度変

化が発現するに要する時間遅れが大きくなるため、と考えることができる。したがって、本章でいう縦断勾配の効果モデルのタイムラグは、おそらく縦断勾配の変化率に依存していると考えられるだろう。

また逆に縦断勾配差が大きくなおかつ縦断曲線長が小さいケースでは、交通容量が観測される1300~1400[veh/hr]に比較して小さい結果となっている。このようなサグの構造については、運転者にとってサグであることの視認性がよいことから、勾配変化が視認できることを要因とする加速行動が加わり、平坦路と同様の追従挙動を想定したシミュレーションでは記述しきれない結果となったものと思われる。縦断曲線半径が1400m程度以下のサグ構造では、サグの視認性がよいとの報告¹⁰⁾があることもこれを裏付けるものである。

6.5 追従走行モデル各項の感度

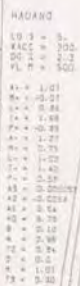
この節では、秦野サグで観測された49台の走行車両の平均パラメータをもとに、追従走行モデルの各項の走行挙動に対する感度を評価する。追従走行モデルの3つの項のうち、第2項の希望する車間距離からの偏差に反応する項を取り除いたケースと、第3項の前方車両の加速度に合わせる項をそれぞれ取り除いたケースの2通りのシミュレーションを実施する。具体的にはモデル構造の一部を無効とするだけで、その他の条件は秦野サグを想定したケースと同様である。

シミュレーションの結果が図6.7と図6.8である。図6.7は第2項を取り除いたケースであり、図6.8は第3項を取り除いたケースの結果である。

図6.7によれば、サグが隘路となる現象は再現されており、第2項の感度がその他に比較して小さいことが推定される。しかしサグの交通容量が実測値よりも小さく、サグを通過後の速度回復が実現象よりもさらに緩慢である。したがって第2項は速度回復過程の加速行動への貢献度が大きいことがわかる。

また図6.8からは、前方車両の加減速に合わせる効果をつけ加えないと、近接走行時には運転者による速度と車間距離の調節挙動を充分に記述することができず、簡単に急停止してしまう結果となっている。

以上のように、実際の運転者の追従走行をシミュレートする際には、式(5.8)で仮定した3項のそれぞれが走行状況に応じた貢献を果たしているのである。



81

第7章 結論と今後の課題

7.1 研究のまとめ

本研究で明らかにした事項を以下にまとめる。

既往の道路交通流に関する研究事例を概観し、サグが交通容量上の隘路となりうることで現行の道路の設計基準では想定されていないことを確認した。また、サグの隘路現象の事例調査は過去いくつかなされているものの、その原因をつきとめるまでには至っていないことを指摘した。さらに、これまで提案された追従走行モデルには、実際の交通現象を再現するために汎用的に使用できるものが存在しないことを確認した。

試験走路における追従走行実験を実施し、5人の運転者について昼間・夜間それぞれ20分間程度にわたる追従運転挙動の実測データを収集した。データの分析から、車間距離—走行速度関係については、走行速度に対する運転者の選択する車間距離の自由度はさほど大きいものではないが、これには個人差が現れることを確かめた。一方、昼と夜との相違は個人差ほど大きくないことがわかった。

中央高速道路において隘路となる中野サグを含む区間の走行実験を実施した。この走行データから隘路の上流では渋滞した交通流特有の速度変動が大きいものの、サグ地点の隘路を通過するとごく弱い加速で速度を回復する実態を把握することができた。この弱い加速度による速度上昇パターンは渋滞の継続中において定常的であることも確かめられた。

首都高速道路において交通流のビデオ観測を実施し、画像処理手法によって不特定多数の車両の加減速行動のデータを計測した。このデータから相対速度に反応する追従車の加減速の構造を明らかにした。すなわち加減速のタイムラグは一定値ではなく、前方車両の加速度への依存度合いが高いことが確かめられた。また、相対速度の大きさに対する加速度の反応感度も一定値ではなく、車間距離と走行速度に依存することを明らかにした。これらの依存度合いは加速時と減速時とは異なることがわかった。

追従走行モデルの構造を検討し、相対速度を解消しようとする行動と、希望する車間距離に接近しようとする行動、さらに前方車の加減速に合わせようとする補正

項とでモデルを構築した。この追従走行モデルの基本構造をもとに、試験走路において走行データが計測された5人の運転者の追従走行モデルのパラメータを推定した。さらに推定されたパラメータを用いて実際の追従挙動を再現を試みたところ、実測で得られた各運転者の車間距離-走行速度の関係を良好に再現することができた。しかし、運転者の加減速行動に含まれるランダム性は、このモデルでは十分に記述できない限界が明らかになった。

運転者の走行挙動に対するサグの影響とは、縦断勾配変化への対応が必然的に遅れることであるとの仮説を提起した。この仮説を縦断勾配変化の補償対応遅れとしてモデル化し、追従走行モデルを用いてサグの陥路現象の再現を試みた。その結果、初期条件に依存することなくサグに陥路が停留し、ここからの各車両のごく弱い加速行動が定常的に継続するという、実測から得られているサグの陥路現象の特徴がシミュレーションでも再現されることを確認した。

7.2 今後の課題

本研究では縦断勾配の車両走行に対する影響とは、勾配変化の補償対応遅れである、と捉えてモデル化を行った。今後は実際の運転者の加減速の操作行動そのものを分析することによって、運転者がどのように走行状況を認知し、加減速ベグルの操作を行うか、という人間の行動との対応付けをはかる必要があると思われる。

今回行った縦断勾配変化の影響のモデル化は、縦断勾配の変化が視認できないサグを対象としている。一方、勾配変化の視認しやすいサグは陥路となりにくいという事実が実際に観測されている。したがって視環境としてサグであると充分認識が可能なサグ構造の縦断勾配差や縦断曲線長の目安を定量化することが必要である。線形設計上では平面曲線との組合せを含め、興味ある問題として残っている。

追従走行モデルについては、既往のモデルに比較して汎用性の高いものを提案することができた。しかし、運転者の予測行動についてはこれを加味した経験的な項をつけ加えた構造となっている。また、モデルそのものは既往のモデルの問題点であった追突の回避を100%保証するものでもない。近接した走行時のシミュレーションでは、実際の追従行動とは異なった過敏な振る舞いを見せる場合がある。人間の行動のさらに深い洞察とモデル化により、近接走行時の追従走行モデルの改善を行う余地がある。

人間の行動は機械のように行われるとは思われず、追従モデルのパラメータにはランダム性があるはずである。パラメータの個人間の分布、および個人内の分布を

明らかにすることも今後の課題である。

追従走行モデルのパラメータは多分に運転者の精神状況に依存する。たとえば、夜明けのような環境の急変時には元気が出るとか、渋滞に巻き込まれていくうちに追従走行の意欲が低下するといった報告がある。追従走行モデルのパラメータの人間くささについても研究発展が期待できる。

さらに、近年急速に発達しつつある自動車のインテリジェント化技術を利用し、人間の運転操作を支援することによって、渋滞減少を回避、または軽減することも近い将来は有望であると思われる。このような車両側からの安全かつ円滑な交通流を実現するための研究開発も、今後の重要な課題である。

今回のモデル化は乗用車を念頭において実施したが、わが国の道路交通でとりわけ構成率の高い大型車の追従特性は、乗用車の特性とはかなり異なるものと考えられる。大型車の追従挙動の分析も今後の興味ある研究課題である。

本研究では高速道路の渋滞現象のうち、サグに焦点を当てていくつかの知見を得ることができた。これらの知見は、もう一つの問題箇所である長大トンネルの渋滞現象へ応用することができるはずであり、今後はこの方面についても研究を進めたいと考える。

謝辞

この研究を進めるに当たっては、さまざまの方々にご指導とご協力をいただきました。心から感謝の念を捧げたいと思います。中でも直接ご指導を賜った東京大学工学部越正毅教授からは終始的確な助言と鼓舞激励をいただきました。厚く御礼申し上げます。また東京大学生産技術研究所の桑原雅夫助教授には日頃から公私にわたっていろいろとご配慮を賜りました。深く感謝いたします。また審査に当たって貴重な時間を割いていただいた東京大学工学部島崎敏一教授、清水英範助教授、東京大学生産技術研究所の柴崎亮介助教授の先生方にも心より感謝の意を表したいと思います。

走行実験の実施に際しては、建設省土木研究所の道路研究室の方々には多大なご配慮といただきました。また実験に参加してくれた6人の学生諸君にはこの場を借りてあらためてお礼を言いたいと思います。

日本道路公園、および首都高速道路公園の方々にはデータを提供していただくとともにいろいろとお教えを頂戴しました。深く感謝いたします。

研究室のメンバーにも日頃から、また走行実験や観測、データ解析等にわたってご協力をいただきました。屋外、屋内にわたるイベントの際にはいろいろと配慮をしてもらいました。勝負の時にはきついお見舞いも頂戴したこと、これも一応感謝しておかねばならないでしょう。また論文のまとめの間際になって何度かハードディスクが壊れて困ったときには、ご心配をいただきました。誠にありがとうございました。

この研究以外に関することでも、実に多くの方々のご支援を頂戴し、さまざまな機会でお教えをいただきました。おかげさまで区切りをひとつつけることができ、この場を借りて御礼申し上げます。

最後になりましたが、著者のわがままを許してくれた両親には深く感謝したいと思います。また、休日にもなかなか時間を割いてやれなかった子どもたちと、いつも暖かく見守ってくれた妻啓子にあらがうと述べてしめくくることにいたします。

1994年4月吉日

尾崎晴男

参考文献

- 1) Highway Capacity Manual (1985) Transportation Research Board.
- 2) 道路構造令の解説と運用 (1983) 日本道路協会.
- 3) 道路の交通容量 (1984) 日本道路協会.
- 4) Edie, L. C. and Foote, R. S. (1958) Traffic Flow in Tunnels, Proc. Highway Research Board, 37, 334-344.
- 5) Edie, L. C. and Foote, R. S. (1960) Effect of Shock Waves on Tunnel Traffic Flow, Proc. Highway Research Board, 39, 492-505.
- 6) Edie, L. C. and Foote, R. S. (1961) Car-following and Steady-state Theory for Non-congested Traffic, Oper. Res. 9, 66-76.
- 7) Edie, L. C. and Foote, R. S. (1961) Experiments on Single-Lane Flow in Tunnels, Theory of Traffic Flow, Elsevier, 175-192.
- 8) Edie, L. C. and Baverz, E. (1963) Generation and Propagation of Stop-Start Traffic Waves, Proc. 2nd Intern. Symp. on the Theory of Traffic Flow, 26-30.
- 9) Foote, R. S. (1963) Single Lane Traffic Flow Control, Proc. 2nd Int'l Symp. on the Theory of Traffic Flow.
- 10) 越正毅, 岩崎征人, 大蔵泉, 西宮良一 (1981) 渋滞時の交通流現象に関する研究, 土木学会論文報告集, 第306号, 59-70.
- 11) 岩崎征人 (1981) 車両の追従挙動と巨視的交通現象に関する研究, 東京大学学位論文.
- 12) Koshi, M., Iwasaki, M., and Ohkura, I. (1983) Some Findings and an Overview on Vehicular Flow Characteristics, Proceedings of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 403-426, University of Toronto Press.
- 13) 越正毅 (1984) 高速道路トンネルの交通現象, 国際交通安全学会誌, 10, 1, 32-38.
- 14) 森浩 (1986) 都市間高速道路における追従特性と交通容量の研究, 東京大学学位論文.
- 15) 越正毅 (1986) 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, 1-7.
- 16) 岩崎征人他 (1990) 車両感知器データを用いた都市間高速道路の交通流特性解析, 土木計画研究・論文集, 8, 153-160.
- 17) Koshi, M., Kuwahara, M. and Akahane, H. (1992) Capacity of Sags and

Tunnels on Japanese Motorways, ITE Journal, 62, 5, 1-22.

- 18) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和 (1993) 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, Vol.458, 4-18.
- 19) 岩佐昌明, 越正毅, 桑原雅夫, 尾崎晴男 (1990) 高速道路サグおよびトンネルの交通容量, 土木学会第45回年次学術講演会, 544-545.
- 20) 岩佐昌明 (1990) サグ及びトンネルの交通容量に関する研究, 東京大学修士論文.
- 21) 大口敬 (1992) 高速道路サグの道路構造と視認性、高速道路と自動車, 35, 11, 31-37.
- 22) 大口敬 (1993) 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.
- 23) 秀一浩 (1991) 自由流から渋滞流への遷移過程に関する研究、東京大学修士論文.
- 24) Persaud, B.N. and Hurdle, V.F. (1988) Some New Data That Challenges Some Old Ideas About Speed-Flow Relationships, Trans. Res. Rec. 1194, 191-198.
- 25) Pipes, L. A. (1953) An Operational Analysis of Traffic Dynamics, J. of Applied Physics, 24, 3, 274-287.
- 26) Herman, R., Montroll, E. W., Potts, R. B., and Rothery, R. W. (1959) Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following, Operations Research, 7, 86-106.
- 27) Gazis, D. C., Herman, R. and Potts, R. B. (1959) Car-Following Theory of Steady State Traffic Flow, Oper. Res., 7, 499-505.
- 28) Gazis, D. C., Herman, R. and Rothery, R. W. (1961) Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, Oper. Res., 9(4), 545-567.
- 29) Herman, R. and Rothery, R. W. (1963) Car Following and Steady State Flow, Proceedings of Second International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 1-11.
- 30) Herman, R. and Rothery, R. W. (1967) Propagation of Disturbances in Vehicular Platoons, Proceedings of Third International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 14-25.
- 31) Herman, R. and Potts, R. B. (1967) Single-Lane Traffic Theory and Experiment, Proceedings of Third International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 120-146.
- 32) May, A. D. and Keller, H. E. M. (1967) Non-Integer Car-Following Models, Highway Research Record, 199, 19-32.
- 33) Ceder, A. and May, A. D. (1976) Further Evaluation of Single- and Two-Regime Traffic Flow Models, Transp. Res. Re. 567.

- 34) Cedar, A. (1976) A Deterministic Traffic Flow Model for the Two-Regime Approach, Transp. Res. Re. 567.
- 35) Easa, S. M. and May, A. D. (1980) Generalized Procedure for Estimating Single- and Two-Regime Traffic-flow Models, Transp. Res. Rec., 772.
- 36) Easa, S. M. (1982) Selecting Two-Regime Traffic-flow Models, Transp. Res. Rec., 862.
- 37) Treiterer, J. and Myers, J. A. (1974) The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow, Proceedings of Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 13-38.
- 38) Kometani, E., Sasaki, T. (1958) On the Stability of Traffic Flow, J. Operations Research (Japan), 2, 11-26.
- 39) Kometani, E. and T. Sasaki (1961) Car-Following Theory and Stability Limit of Traffic Volume Operations Research Society of Japan, 3-4.
- 40) Newell, G. F. (1963) Instability in Dense Highway Traffic, a Review, Proceedings of Second International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 73-83.
- 41) 大庭孝之 (1988) 車両の追従挙動に関する実験的研究、東京大学修士論文。
- 42) Xing, J. (1989) A Study on Car-Following Behaviour, 東京大学修士論文。
- 43) Xing, J., 大口敬、越正毅 (1991) 高速道路単路部の交通流の動的特性、土木計画学講演集14。
- 44) Xing, J. (1992) A Study on Bottleneck Phenomenon and Car-following Behaviour on Motorways, 東京大学学位論文。
- 45) Bhattacharyay, D. (1993) An Analysis of Car-Following Behaviour, 東京大学修士論文。
- 46) Benekohal, R.F. and Treiterer: CARSIM: Car-following Model for Simulation of Traffic in Normal and Stop-and-Go Conditions, Trans. Res. Rec. 1194.
- 47) 菅野道夫 (1988) ファジィ制御, 日刊工業新聞社。
- 48) 大口敬 (1990) ファジィ推論を用いた車両の追従挙動モデル, 東京大学修士論文。
- 49) 大口敬、越正毅、桑原雅夫、赤羽弘和 (1990) ファジィ推論を用いた車両の追従挙動モデル、土木計画学研究・講演集、13。
- 50) Kikuchi, S. and Chakroborty, P. (1990) Car-Following Model Based on Fuzzy Inference System, Trans. Res. Rec. 1365, 82-91.
- 51) 東名高速道路 (東京～三ヶ日間) 路線図 (1986) 日本道路公団東京第一管理局。
- 52) 赤羽弘和、大庭孝之、桑原雅夫、越正毅 (1988) 車両の走行挙動計測システム、土木計画学研究・講演集、11。

- 53) 中央自動車道 高井戸～小淵沢（河口湖）路線図（1986）日本道路公団第一管理局八王子支局.
- 54) 中村英樹他（1989）高速道路織り込み区間での交通流観測と運転挙動解析. 土木計画研究・講演集, 12, 61-67.
- 55) 中村英樹（1991）織り込み区間の交通容量に関する研究、東京大学学位論文.
- 56) 尾崎晴男（1991）自動車の追従走行挙動に関する研究、土木計画学講演集14.
- 57) Ozaki, H. (1993) Reaction and Anticipation in the Car-Following Behavior, Proc. of 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 349-366.
- 58) 志水清孝（1976）システム最適化理論, コロナ社.
- 59) 岸寛之（1991）中央道(高井戸～小淵沢)の渋滞とその特性、高速道路と自動車, 34, 4, 17-27.
- 60) 竹山協三（1991）カオス、裳華房.



