

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

TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS UNDER FREE AND CONGESTED
FLOW CONDITIONS ON AN INTERCITY EXPRESSWAY
USING TRAFFIC DETECTOR DATA

岩崎征人*, 渡辺隆*, 青山直司**, 吉住陽行***

M. IWASAKI, T. WATANABE, N. AOYAMA, and H. YOSHIZUMI

The purpose of this paper is to analyze the traffic flow characteristics under congested conditions on the intercity expressway, especially an accordion-like action, and the maximum flow rate at the bottlenecks. To analyze the relationships between speed characteristics and geometric factors is also another one of the objectives of this paper.

In the first part of this paper, the authors discussed traffic phenomena of the congested flows up- and downstream of the bottlenecks, and clarified the accordion-like actions also appeared in the intercity expressway same as the urban expressways. In the middle part, characteristics of the free speed at each detector station and lane were analyzed. In the last part, a multivariate analysis is applied to quantify the affects of the geometric factors to the free speed.

1. はじめに

都市間高速道路上の長大トンネルの入口やサグ部あるいはS曲線が、交通容量に大きな影響を与えていることが指摘されている¹⁾。これら隘路の交通容量は、渋滞時にはほぼ2600~2800台/時・2車線であり、単路の容量の60~70%に低下するといわれている。これらの区間がなぜ隘路になるのかは、越らによって運転者の追従挙動との関係という側面から継続的に研究されている^{2), 3), 4), 5)}。しかしながら、高速道路の幾何構造の要因が、交通流にどのような影響を及ぼしているのかについては必ずしも明らかにされているとは言いがたい。上述したような幾

何構造要因が交通容量を低下させているのであれば、当然のことながら交通流現象の他の側面、たとえば自由速度や自由流と渋滞流の境界速度などにも影響を及ぼしているはずである。もし、これらの速度が道路の設計速度を反映しているのであるならば、自由速度や境界速度と幾何構造要因との関係を知ることとは、道路の設計にとって不可欠なことがらである。

本研究の目的は、都市間高速道路における交通流特性、とくに従来ほとんど明らかにされてこなかった渋滞流領域での交通流現象を明らかにし、都市内高速道路での現象と比較検討することである。同時に、都市間高速道路の幾何構造要因と交通条件とが速度にどのような影響を与えているかを知ること、本研究の目的の一つである。速度低下の少ない道路線形がどのようなものであるかを知ること、結局のところ、交通容量の低下の少ない道路を計画・設計するために必要な情報となるはずである。

* 武蔵工業大学 土木工学科
〒158 世田谷区玉堤 1-28-1

** 静岡県

*** 京浜急行電鉄株式会社

2. 従来の研究の概観と本研究の位置付け

都市内高速道路の隘路上流に発生する渋滞流を多数観測して、隘路からの距離と $Q-K$ 相関特性との関係を明らかにした研究が著者の一人によって報告されている⁶⁾。この一連の研究においては、首都高速道路上の渋滞流の特性が体系的にまとめられている。しかしながら、都市間高速道路の渋滞流領域での交通流特性はほとんど未解明である。都市間高速道路で発生する渋滞流領域での交通流特性を明らかにすることは、今後必要性が増大する都市間高速道路の交通管制にとって不可欠な情報である。

越は、都市間高速道路上で発生する渋滞に着目し、長大トンネルの入口部やサグ部あるいはS曲線の存在が容量上の隘路であることを報告した¹⁾。越らは、これら隘路での渋滞発生の原因がそこを通過する車両の追従挙動にあるとして、多くの追従実験を行ない貴重な情報を得ている⁷⁾。しかしながら、この研究でも都市間高速道路上で発生した渋滞流領域での交通流特性を体系的に捉えているとは言い難い。

交通容量に影響する道路と交通の要因については、HCM^{8), 9)}や我が国の文献¹⁰⁾に詳述されている。しかし、我が国においては、ここで述べられている要因の定量的な影響度は、いくつかの要因を除いて必ずしも明らかにされているとは言い難い。まして速度に影響する幾何構造要因については、街路でもまた高速道路でもこれまでほとんど明らかにされていない。

都市内及び都市間高速道路での特定断面あるいは車線での交通流特性、たとえば交通容量や $Q-K-V_s$ 相関特性あるいは登坂車線での交通特性などを個別に解析した研究・報告は多数存在する¹¹⁾。しかし、これらの研究は、ほとんど幾何構造条件について体系的には解析されておらず、これらの要因と交通特性との関連を明らかにしたものは見当たらない。

このように見ると、これまでの研究で速度と幾何構造要因や交通条件との関係を解析したものは見当たらない。本研究は、高速道路での速度と幾何構造や交通の要因との関係を定量的に把握することは、高速道路の計画や設計にとって不可欠なことである、との立場にたっている。本研究は、速度の代表値

として $Q-V_s$ 相関図上で定義される自由速度(V_f)を用いて、自由速度と幾何構造要因及び交通条件(大型車混入率)との関係を明らかにしようと試みたものである。ここで自由速度を用いたのは次のような理由である。すなわち、自由速度は通常 $Q-V$ 平面上の交通量ゼロで定義される状態量であるから、原則的には交通量の影響は受けない。それ故、自由速度には道路の線形条件と大型車混入率だけが影響しているだけであると考えたからである。

3. 解析に用いた資料の概要

解析に用いたデータは、東名高速道路の首都高速道路との接続部から袋井までの間(約200km)に設置されている車両感知器から得られたものである。この区間には、上りで48地点、下りで58地点に感知器が設置されている。各地点は、すべての車線に感知器が設置されている。データはMT(磁気テープ)に収録されている。このMTデータは、'89年5月の一ヶ月分である。データの内容は、集計単位時間5分の交通量(Q)、大型車交通量、空間平均速度(V_s)および時間占有率(O_{cc})である。

なお、106地点の感知器地点のうち、いくつかの感知器が故障したり、明らかに異常な値を示したものがあつた。それらの感知器データは解析の対象から除外している。

幾何構造については、MTデータとは別途入手した。この資料から、感知器設置地点の勾配並びに曲線半径、及び感知器設置地点の上流と下流のそれぞれ1.5km以内に存在するS曲線、サグ及びクレストを構成している要因(勾配、半径、車両感知器設置地点からの距離など)を抽出した。1.5kmの区間に着目したのは、車両が自由速度で走行したときに約1分間で走行できる距離を仮定したものである。1.5km以上離れた区間の幾何構造要因は当該地点の走行状態には直接影響しないとして対象から除外した。

4. 都市間高速道路の交通流特性の解析

(1) 観測時の交通状況の概要

ここで利用したMTデータは、'89年5月に収集されたものである。データを再生したところ、5月に

については3日の夜半過ぎには下り方向で都夫良野トンネルを先頭として、最大で首都高速道路までの70km以上の渋滞が生じていた。この大渋滞は、必ずしも渋滞の発生場所が一箇所だけではなく、いくつかの地点から異なった時間に発生していた。大型車混入率は、全線にわたってほぼひとしく上り・下りともに20%から55%の範囲であった。

(2) 東名高速道路上の渋滞現象について

5月の10日間のMTデータから、5分間交通量(Q)と平均速度(V_s)とを用いて、 $Q \times V_s$ (交通流の運動エネルギーに相当)なる状態量を作成した。この量を大きさのクラス別に時間-距離図上に濃淡で表現した(図-1)¹⁴⁾。ここに示したものは、下り方向のものである。この図で濃く表されている部分は、高交通量・高速度の交通状態を示している。濃い部分の中で薄く表されている部分は低交通量・低速度の、いわゆる渋滞領域の交通状態を示している。

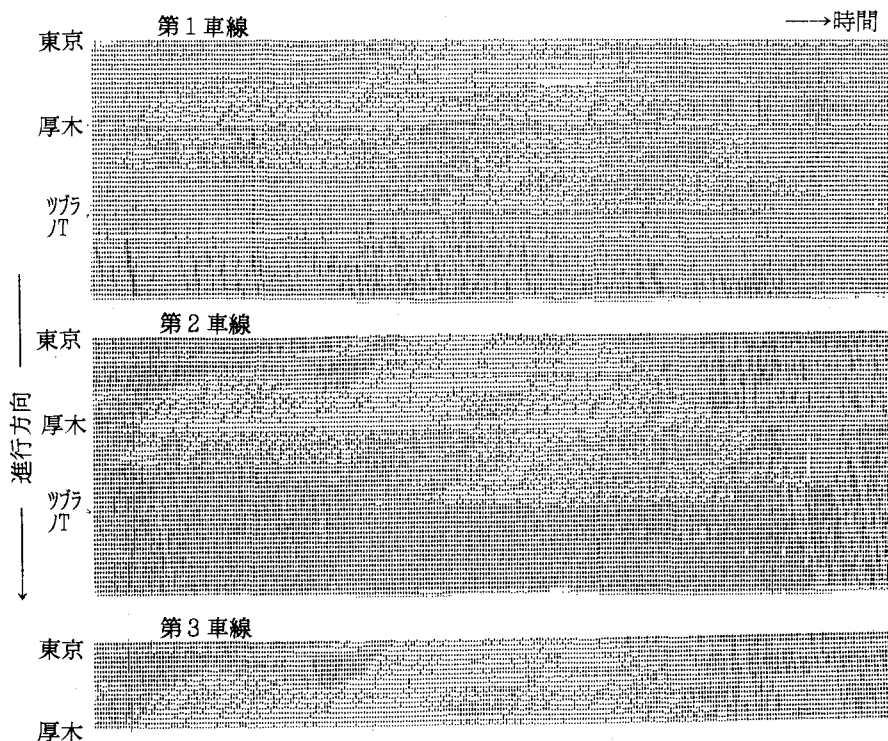


図-1 交通流のエネルギー($Q \times V$)を用いた渋滞現象の表現
東名高速道路 下り方向 (1989.5月)
濃い部分：高交通量・低密度
淡い部分：低交通量・高密度

この図によって、東名高速道路上の隘路部を明確に特定することができる。すなわち、この図でもっとも東京よりの地点から見てゆくと、下り方向の隘路部は、3車線から2車線に車線が減少する厚木IC付近(34.9kp)、秦野のS曲線部付近(46kp)、および都夫良野トンネル下り入口付近(67.8kp)の3箇所である。

同様の方法で作成した上りの時間-距離図によれば、都夫良野トンネル入口付近(69.5kp)が隘路になっていることを指摘できる。なぜ、ほとんどの区間で上りと下りが平行している同一の路線で隘路の数が異なるのかは、次のような理由であろう。すなわち、5月の長期連休での交通は、連休の始まりには交通が集中するが、帰宅の交通(上りの交通)は分散する。その結果、交通の集中は連休開始日時ほどにはならない。そのため、上り方向については最も交通容量の低い隘路だけが渋滞発生の頭となったものであろう。

都市内高速道路での渋滞現象については、既に文献^{12), 13)}、

¹⁴⁾に詳述されている。それによれば渋滞時に発生する疎密波は、①約20km/hの伝播速度をもっている、②隘路から上流に伝播するほど疎密波の振幅は増幅するが、速度には上限があり、その値はほぼ45km/hである、及び③疎密波は隣接する車線間で同期する性質をもっている、等の性質のある

ことが報告されている。

図-1を見ると、東名高速道路で発生した渋滞流の性質を知ることができる。すなわち、図-1からも明らかなように、都市間高速道路での渋滞についても、都市内高速道路の場合と同様に疎密波の発生を見ることができる。そして、この疎密波は走行車線、第2走行車線、及び追越し車線で殆ど同時に発生し、消滅しており、都市内高速道路の場合と同様、車線間で同期していることが知られる。

図-1にはまた、自由流領域と渋滞流領域との密度境界の衝撃波の伝播状態が明瞭に現れている。この密度境界の伝播速度は、試算によれば、ほぼ7から14km/hとなっており、この速度は疎密波の伝播速度に比べやや低い値となっていることがわかる。すなわち、ここに示した渋滞流内部に出現している疎密波の伝播速度は、都市内高速道路の場合(約20km/h)⁶⁾とほぼ同様の速度(約17km/hから24km/h)となっていることが確認できた。

自由流領域と渋滞流領域との密度境界の衝撃波速度と疎密波の伝播速度が異なる理由は、交通流の衝撃波の基礎理論をもちいることで次のように説明できる¹⁵⁾。すなわち、渋滞発生直前の交通流は、自由流領域であって、かつ隘路の容量よりも高い交通流率が出現することが知られている¹⁾。このような交通需要が隘路に到達すれば渋滞が発生する。しかし、このとき隘路の上流に発生する交通流は、自由流から渋滞流への遷移状態にあることから、疎密波中の疎部ほどには速度が低下していないし、また交通量も容量より低いとしても疎部よりは高い値となっている。このように考えるならば、このとき発生する密度境界に発生した衝撃波の伝播速度は図-2に示したような速度(C_b)になる。一方、疎密波は、渋滞流領域でだけ発生するものであるから、図-2に示した速度(C_a)で伝播する。その結果、この概略図で示すような伝播速度の差が生じる。また、隘路によって密度境界の伝播速度の違いが生じる理由としては、自由流領域における隘路の最大交通流率出現時の速度と渋滞領域の疎部の上限速度とに係わっていると考えてよいであろう。図-2に示すように、隘路の最大交通流率が異なれば、衝撃波の伝播速度(C_b)も異なってくるからである。しか

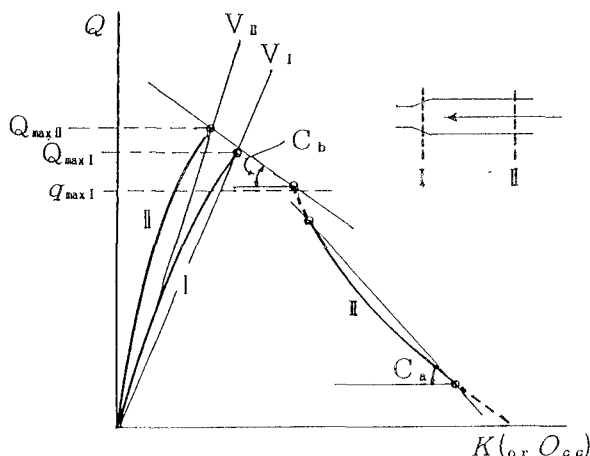


図-2 Q-K平面でのShock-waveの伝播速度表示

し、本論文ではこの点について詳細な解析を行っていないので、詳しい点については不明である。今後解析してゆくべき交通現象として、興味ある課題であるといえる。

(3) Q-O_{cc}。相関図で見た隘路とその上下流における交通流特性

(2)で述べたように、5月の交通状態でみると、東名高速道路の下りでは3箇所、上りでは1箇所の渋滞がそれぞれ発生していた。この節では、下りの都夫良野トンネル入口直近とその上下流地点に設置された感知器データを用いて、隘路とその上下流での交通流の特性について考察してゆく。

上述したように、下りについては3箇所から渋滞が発生していた。しかし、都夫良野トンネル入口の上流で発生した渋滞は、図-1からも明かなように対象とする時間帯では、都夫良野トンネルから発生した渋滞がこれらの地点にまで延伸してきている。このため、これらの地点の渋滞時の交通量は、結局のところ都夫良野トンネルの容量に支配されることになる。そのため、隘路での自由流領域と渋滞流領域の最大交通量とをともに知ることができるのは都夫良野トンネル地点だけである。

図-3, 4, 及び5には、下り方向の都夫良野トンネル地点を挟んだ3地点の走行車線でのQ-O_{cc}相関図を示したものである。都夫良野トンネル入口の直近上流地点(約0.2km上流)では、自由流と渋滞流とが明確に分離されている。渋滞流領域での交通

量は、最大交通流率でほぼ1500台/時であり、最小で1100台/時となっており、交通量の変動幅は比較的小さい(図-4)。上流地点(約1.3km上流)の渋滞時の交通流率は隘路に比べより大きな変動幅となっており(図-5)、この傾向は上流ほど大きくなっているのが認められた。このことは、既に都市内高速道路での渋滞流解析⁶⁾で明らかにされているように、疎密波の増幅現象が都市間高速道路でも発生

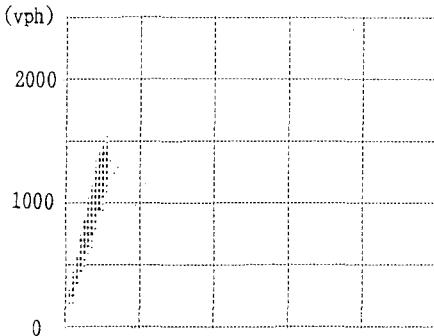


図-3 出口約1.0km下流地点
(走行車線)

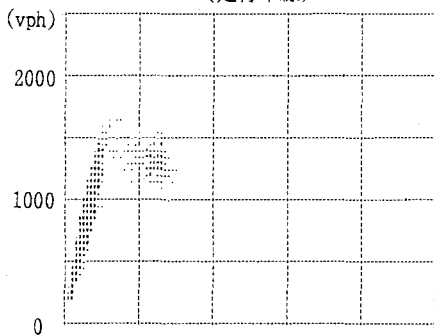


図-4 入口約0.2km上流地点
(走行車線)

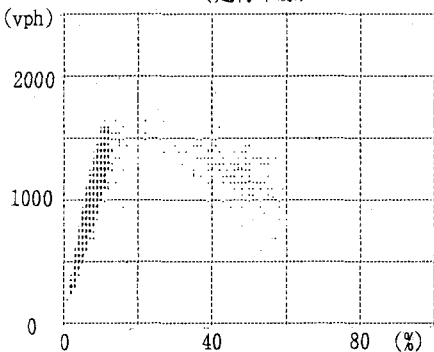


図-5 入口約1.3km上流地点
(走行車線)

都夫良野トンネル上・下流地点での $Q-V_{cc}$ 相関図

していることを意味している。一方、隘路の下流(図-3)では渋滞流領域が見られない。これは、既に広く知られているように、ここに出現する交通量が隘路の最大交通流率以上の交通量とならないためである。それゆえ、この地点の最大交通流率は、隘路の容量を意味していると考えてよい。

以上の知見から、東名高速道路下りの都夫良野トンネルの5分間最大交通流率は、自由流では走行車線で約1500台/時、追越車線で約2100台/時、渋滞流では走行車線で約1300台/時、追越車線で約1400台/時であると考えてよいであろう。同様な考えから、上りの都夫良野トンネル入口の5分間最大交通流率は、自由流で走行車線で約1500台/時、追越車線で約2100台/時と推定できる。しかし、渋滞流については必ずしも定量的には特定できなかった。

5. 自由速度(V_f)と幾何構造要因との関係

(1) 各地点における自由速度の特性

ここでは、上りと下りの全感知器設置地点(106地点)のすべての車線上の $Q-V_s$ 相関図を作成した。さらに、 $Q-V_s$ 相関図上で、自由流と渋滞流との境界速度を全車線一律に60km/hと仮定し、 $V_s > 60$ km/hの領域で直線回帰を行い自由速度(V_f)を求めた。図-6には、代表的な断面における自由流領域での $Q-V_s$ 相関式の一例を示した。

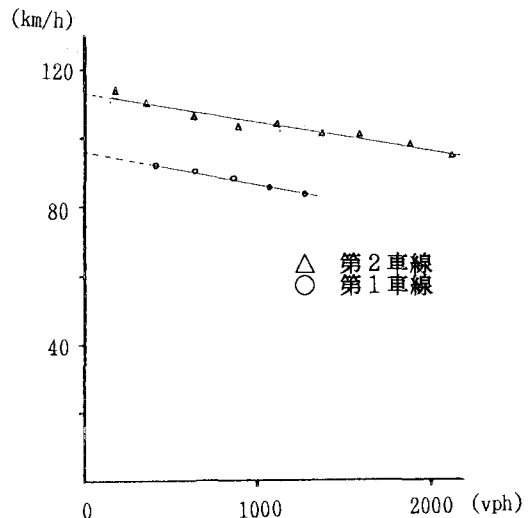


図-6 自由流領域での各車線の
 $Q-V_s$ 相関の一例(2車線区間)

図-7は、5月の下り方向について、各車線毎の自由速度を道路の延長方向での分布として示したものである。これによれば、3車線区間と2車線区間とでの自由速度の振る舞いには、明らかに差がありそうである。すなわち、2車線区間の走行車線の速度は、3車線区間の走行車線と第2走行車線との中間的な性質を示しているように見える。一方、2車線区間の追越し車線（第2車線）の速度は、3車線区間の追越し車線（第3車線）の速度と似た性質を示している。このように、3車線区間の自由速度と2車線区間の自由速度の振る舞いは明らかに異なっていることが指摘できる。それ故、3車線区間の走行車線と2車線区間の走行車線、及び3車線区間の第2走行車線と2車線区間の追越し車線とを同一に扱うことはできそうにない。

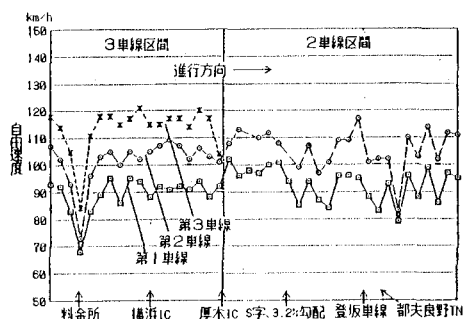


図-7 車線別自由速度の地点変動

4-(2)でも指摘したように、下りでは3箇所から渋滞が発生していた。これらの隘路地点の自由速度を見ると、図-7でも明らかなように、周辺の地点の自由速度と比べ低い値となっていることがわかる。また、隘路以外の地点についても、周辺の地点に比べ低い値を示す地点が存在している。これらの地点の自由速度低下の原因については従来の研究・調査では必ずしも明らかにされてはいなかったものである。おそらくは、従来から隘路と指摘されていた地点と同様に、幾何構造の影響によるものと考えて良いであろう。図-8には、代表的な幾何構造要因と自由速度との単相関関係を示している。これによれば、地点の自由速度が幾何構造に影響されていることがわかる。

(2) 自由速度に影響する幾何構造要因の解析
前節では、車線毎の自由速度の分布と地点におけ

る変動とを見てきた。その結果、自由速度が車線間

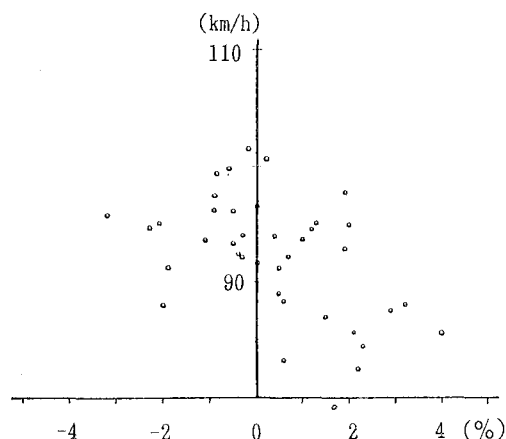


図-8 自由速度と地点勾配との関係

で差のあること、及び地点間で差のあることを示した。もし、自由速度 (V_f) が幾何構造要因と交通条件とによって規定されるのであるならば、地点間の差は説明できることになる。

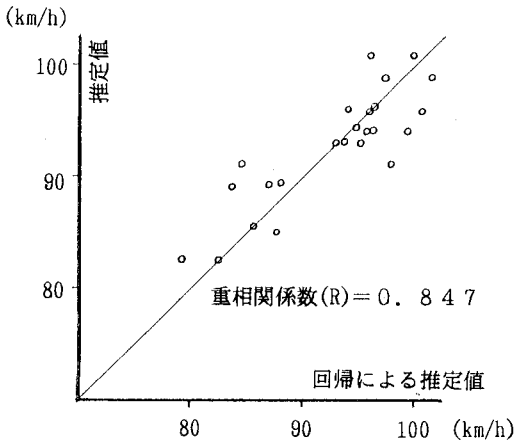
本節ではこのような前提にたって、地点毎の自由速度を幾何構造要因と大型車混入率とによって説明するモデルを作成する。モデル作成に用いた説明変数は以下のようなものである。

- ① 感知器設置地点の幾何構造要因
 - (a) 曲線半径
 - (b) 勾配
- ② 感知器設置地点前後1.5km以内に存在する幾何構造要因
 - (a) S曲線の半径和
 - (b) S曲線の変曲点までの距離
 - (c) サグの底部までの距離
 - (d) サグの勾配和
 - (e) クレストの頂点までの距離
 - (f) クレストの勾配和
- ③ 当該感知器地点の大型車混入率

長大トンネルの入口が、交通容量上の隘路であることは広く知られている。しかし、ここで解析の対象とした区間内の長大トンネルは一箇所（都夫良野トンネル）であつたので、トンネルについては説明要因から除外した。また、上述した幾何構造要因のうちのいくつかについては、感知器設置地点の前後1.5km以内に存在しないものもあつた。このため、本節では線形重回帰分析ではなく、数量化理論第I

類を用いて解析を行った。

まず、上記の全要因を用いた結果では、①「当該地点の勾配」、②「当該地点の曲線半径」、及び③「下流に存在するS曲線の半径和」を除いた他の要因は、自由速度とは高い相関を有していないことがわかった。そこで、これら①～③の要因を用いてモデルを修正した。計算結果を表－1及び図－9に示した。これによれば重相関係数は0.847であり、各地点の自由速度は「当該地点の勾配」、「曲線半径」及び「下流に存在するS曲線の半径和」によって良好に説明できることがわかる。



図－9 Q-V_s相関図上で回帰した自由速度と自由速度の推定値との関係

表－1 数量化1類による分析結果

要 因	カ テ ゴ リ	サンプル数	カテゴリ ウエイト	レンジ
地点勾配 (%)	$i < -3$	1	4.524	9.804
	$-3 \leq i < 0$	8	3.105	
	$i = 0$	1	0.774	
	$0 < i \leq 3$	13	-1.912	
	$i > 3$	1	-5.280	
地点半径 (m)	$R \leq 1500$	9	-3.731	6.867
	$1500 < R \leq 3000$	7	1.215	
	$R > 3000$	8	3.135	
S曲線の 半径和 (m)	$R \leq 1500$	5	-4.407	6.694
	$1500 < R \leq 3000$	6	2.287	
	$R > 3000$	7	1.891	
	NON	6	-0.820	

「当該地点の勾配」と「曲線半径」との大きさが、自由速度に影響している点については、常識的な結果であるといえよう。加えて、「下流に存在する

S曲線の半径和」の大きさ、とくに半径の和が1500m以下の場合にその影響が大きいことを指摘できる。このように「下流に存在するS曲線の半径和」が自由速度に影響していることについては、在来の研究では明らかにされていなかった点である。しかし、越が容量に影響する幾何構造として指摘¹⁾した「サグ」に関係する要因は、今回の解析では、有意な説明変数として採択されなかった。この点については、今後さらに詳細な解析が必要であるかも知れない。しかし、「下流に存在するS曲線の半径和」が自由速度に有意な影響を与えるという結果は、S曲線の存在が交通容量上の隘路となっているとした研究結果¹⁾を間接的に裏付ける成果である。

なお、大型車混入率が自由速度と高い相関を持っていなかったことは、ここで用いた大型車混入率のデータにバラツキが少なかったことと、各地点間での大型車混入率のバラツキが少なかったことが考えられる。同時にこの要因のカテゴリの分割の仕方が粗かったことも原因の一つとして考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究は、東名高速道路の上りと下りの106地点に設置されている車両感知器から得られた89年5月の10日間データを解析し、以下のような知見を得た。

- (1) ここで使用したデータによれば、東名高速道路下りの隘路は3箇所、それらは、既にいくつかの研究が指摘しているように、東京から見て厚木出口、秦野のS曲線、及び都夫良野トンネル入口である。上りは都夫良野トンネル入口であることがわかった。
- (2) 下り方向の都夫良野トンネル断面の交通容量は5分間交通流率で、自由流では約3600台/時、渋滞流では2700台/時と推定される。上り方向の都夫良野トンネル入口の交通容量は、同様にして自由流では約3600台/時と推定されるが渋滞流については特定できなかった。
- (3) 東名高速道路の隘路から発生する渋滞流の現象は、多くの点で都市内高速道路の現象と類似点を持っていることを明らかにできた。すなわち、①疎密波の車線間同期現象の存在、②疎密波は上流へ伝播するに従い疎密の振幅が増幅すること、

③疎部の速度には上限速度が存在することである。しかし、疎部の上限速度は都市内高速道路の場合に比べかなり高い値であることが推測できた。

(4) 自由流と渋滞流との密度境界の衝撃波の伝播速度は7~14km/hと推定できた。この速度は、渋滞流領域での疎密波の伝播速度(17~24km/h)より低いものであることを明らかにできた。二つの伝播速度の差異は、交通流の衝撃波の基礎理論で説明できることを明らかにできた。

(5) 各地点のデータを用いて、自由流領域での $Q-V_s$ 相関式から自由速度を推定した。この結果、自由速度は車線構成、及び地点によって異なることが知られた。

(6) 各地点の自由速度が当該地点と上下流の幾何構造条件に影響を受けていることを明らかにできた。

(7) 数量化理論第Ⅰ類を用いて自由速度と幾何構造との関係を解析した。その結果、自由速度は当該地点の勾配、曲線半径、及び下流に存在するS曲線の半径和で説明できることを明らかにできた。

(8) その結果、勾配については3%以上の上り勾配、曲線半径については1500m以下及びS曲線については着目した地点の下流に存在する1500m以下の半径和となる区間が自由速度に対して負の影響を与えていることを明らかにできた。ただ、ここで用いた幾何構造分類のうちのいくつかについては、データ数が少ないので結果の信頼度を高めるために、より多く路線での解析が必要であると思っている。

今後の課題としては、次のような現象の解析を行うことで都市間高速道路の交通流特性と幾何構造特性との関係をより一層明らかにすることが可能であろう。

(1) 交通容量を推定するためには、どのような交通状態をもって容量を定義したかが重要である。この点については、本研究の継続課題として現在研究を進めている。

(2) 都市内高速道路については、自由流領域と渋滞流領域との境界速度は、ほぼ40km/hから50km/hであることが知られている。ここで解析対象にした東名高速道路では、とりあえず60km/hを境界速度として用いているが、必ずしも全地点で同一の

速度であるとは言えそうにない。境界速度が地点及び車線でのような値であるかを知ることは、道路上の交通状態を検出するための重要な情報の一つである。それゆえ、各地点の境界速度を推定することが、今後の課題の一つとしてあげられる。

終わりにあたり、貴重なデータを貸与して頂いた日本道路公団東京第一管理局の関係各位に深謝する次第である。MTデータを武蔵工業大学の計算機で直接利用可能なようにコード変換して頂いた三菱総研の森浩氏に感謝いたします。同時に、面倒な計算機処理に辛抱強く付き合ってくれた武蔵工業大学情報処理センターの方々にも感謝する次第である。

参考文献

- 1) 越 正毅: 高速道路の本トルネック容量, 土木学会論文集, No. 371/N-5, pp.1-7, 1986-7
- 2) 大庭 他: 追従挙動における反応遅れに関する研究, 土木学会学術講演集, No. 42, pp. 58-59, 1989-9
- 3) 赤羽 他: 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, 1988-11
- 4) 大田 他: 名神彦根トンネルにおける車両の走行挙動, 土木学会学術講演集, No. 44, pp.156-157, 1989-10
- 5) 大田 他: トンネル部と単独部における車両の追従挙動の比較, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 75-80, 1989-12
- 6) 岩崎征人: 東京大学学位論文, 1981-9
- 7) 前掲 2), 3), 4), 5)
- 8) Highway Research Board: Highway Capacity Manual, Special Report No.87, 1965
- 9) Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, Special Report No.209, 1985
- 10) 日本道路協会: 道路の交通容量, 1984-9
- 11) 例えば、交通工学研究会: 交通容量検討資料, 1986-3
- 12) Mika, H. S. 他: Dual Mode Behavior of Freeway Traffic, H. R. R. No.279, pp.1~13, 1969
- 13) Hillegas, B. D. 他: Investigation of Flow-Density Discontinuity and Dual Mode Behavior, T. R. R. No.495, pp.53~63, 1974
- 14) 越 他: 渋滞時の交通流現象に関する研究, 土木学会論文集, No. 306, pp. 59-70, 1981-2
- 15) T. R. B.: Traffic Flow Theory, Special Report No.165, pp.111~165, 1975