

高速道路の旅行時間がランプ間OD交通量に与える影響の実証分析

上田 大樹¹・井料 隆雅²・朝倉 康夫³

¹正会員 神戸市役所 (〒650-8501 兵庫県神戸市中央区加納町6丁目5-1)

E-mail:hiroki_ueda@office.city.kobe.lg.jp

²正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:iryoy@kobe-u.ac.jp

³正会員 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

都市高速道路の交通量に影響を与える要因のひとつとして旅行時間が挙げられる。旅行時間が交通量に与える影響が明らかになれば、今後の高速道路マネジメントにその知見を活用することが可能となる。ETC-ODデータを用いた既存研究より、ランプ間OD交通量とその旅行時間間の相関関係について一定の知見を得られているが、この研究では時間分解能が低いという問題があった。本研究ではより短時間の集計幅のランプ間OD交通量とその旅行時間間にどのような相関関係があるか分析した。その際、ランプ間OD交通量が従う統計分布をポアソン分布とした上で一般化線形モデルを使用した。分析の結果、ランプ間OD旅行時間が1分長くなった時の交通量の減少率は1~2%程度であるという既存研究と同様の知見が高い有意性をもって示された。

Key Words : ETC-OD, travel time, traffic volume, correlation, generalized linear model

1. はじめに

高速道路の交通需要に影響を与える要因の一つとして旅行時間が挙げられる。高速道路利用者は目的地まで高速で移動できることを期待し、その対価として通行料を支払う。したがって、もし渋滞により旅行時間が長くなれば、利用者は高速道路の利用を控え、その結果として高速道路の交通量が減少することが予想される。たとえば上田らは、ETCの利用率が80%を超える道路について、比較的長期間にわたって蓄積されたETC (Electronic Toll Collection System) 統計データから集計されるETC-ODデータをランプ間ODデータの変動を示す値とみなしてその変動を分析している。そしてその結果として、都市高速道路において、1時間ランプ間OD旅行時間が1分長くなったとき、その交通量が1%程度減少する相関関係の存在を実証的に示している¹⁾。この相関関係は、交通量が旅行時間に与えた影響か、旅行時間が交通量に与えた影響であるかを明らかにすることは出来ない。しかし、一般に、交通量が旅行時間に与える影響は「交通量が増えれば、混雑が発生するので旅行時間も長くなる」という正の相関関係に対応するものであり、交通量が旅行時間に影響を与えるメカニズムとして負の相関関係を出すも

のは考えにくい。したがって、既存研究においてデータが示した負の相関関係は、長い旅行時間を利用者が避けた結果として発生したと考えることができよう。このような旅行時間の変化が交通需要に与える影響を明らかにし、その関係について定量的な知見を得ることができれば、高速道路の需要予測に伴う管理業務や利用者への情報提供といった、各種の高速道路マネジメントにその知見を活用することが期待できる。

上述の上田らの既存研究の問題点のひとつは分析時間幅を1時間としていることである。すなわち、ETC-OD交通量もそれに対応する旅行時間も1時間の単位で集計していることである。1時間という時間は混雑がダイナミックに変化する都市高速道路では長いと言わざるを得ない。1時間間に旅行時間も大きく変動すれば、その時間帯に道路を使用した車両が旅行時間の影響をどのように受けたかを判別することは難しくなってしまう。

本研究では集計時間幅を10分~数10分程度に短くすることで、時間分解能を高め、交通量と旅行時間間の関係について分析した。集計時間幅を短くすることは一見すると簡単なことに見える。しかし、実際には、集計時間幅を短くするほど、時間帯幅内のランプ間OD交通量の総量が数台程度まで減少し、その結果統計的な揺らぎ

が大きくなってしまふ。くわえて、総量が減ることによって、中心極限定理による正規分布での近似的扱いが難しくなるという問題もある。既存研究では誤差項が正規分布に従うという仮定を使用していたが、時間帯幅を短くするとこれが不可能となる。時間分解能を向上させた場合には、ランプ間OD交通量の観測度数がポアソン分布に従う²⁾とした上でそれに適した方法論を適用しなくてはならない。

本研究では、阪神高速道路神戸線上りにおいて取得された2年間分のETC-ODデータを用いて、各ランプ間のOD旅行時間とOD交通量の間には存在する相関関係について、集計時間帯幅を狭めて分析する。本研究では平常時のデータのみを対象とする。時間分解能と確率的誤差の相対的な小ささのトレードオフがとれる集計時間帯幅の決定方法を提案し、それに対してポアソン分布を仮定し、一般化線形モデルを適用して分析する。分析結果に対して、異なる時間帯、あるいは異なるランプペアに対して相関関係にどのような差異があるかを定量的に分類し、その理由を考察する。

2. データの概要と分析時間帯幅の決定方法

本研究で用いたデータは、阪神高速道路神戸線上り方向の区間における2009年7月～2011年6月までのETC-ODデータである。土曜、日曜、祝日、各年の8月11日～8月19日、12月25日～1月5日、さらに平成22年11月9日～11月17日を除いた458日分のデータを用いる。これは、交通需要が平常時とは大幅に異なる予想される、休日、夏季休暇及び年末年始の影響、集中工事による終日通行止めの影響（平成22年11月）を取り除くためである。分析時間は6時～21時とした。分析対象区間は3号神戸線のうち、オンランプを芦屋ランプ以西（本線料金所からの流入を含まない）の8つ、オフランプを西宮出口とする8ペアとする。分析対象区間の概略図を図-1に示した。

分析時間帯幅は以下のアルゴリズムにより交通量を勘案して動的に決定した。以下では、ランプペア i における時間帯幅 k の開始時刻 S_{ik} 、終了時刻 T_{ik} 、時刻 t における分析対象期間全体にわたる平均交通量を $\bar{x}_i(t)$ 、各時間における平均交通量の目標値を \bar{x} とする。

【時間帯決定アルゴリズム】

1. $k=1$, $S_{ik}=6:00$, $T_{ik}=6:00$, $\mu_{ik}=0$ とする。
2. $\mu_{ik} \leftarrow \mu_{ik} + \bar{x}_i(t_{ik})$ とする。
3. $\mu_{ik} \geq \bar{x}$ ならば $\mu_{ik+1} \leftarrow \mu_{ik} - \bar{x}$, $S_{ik+1} = T_{ik} + 0:01$, $T_{ik+1} = S_{ik+1}$ とし、その後 $k \leftarrow k + 1$ 。
 $\mu_{ik} \leq \bar{x}$ ならば $T_{ik} = T_{ik} + 0:01$ 。
4. $T_{ik} = 21:00$ で終了。

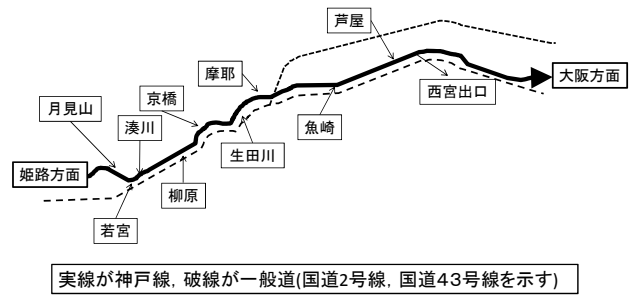


図-1 分析対象区間

は 10 に設定した。ランプ間 OD 交通量がポアソン分布に従う場合には、その値について「分散=期待値」という関係が成立する。分散は統計的ゆらぎの幅（標準偏差）の二乗なので、期待値が小さければ小さいほど期待値に対するゆらぎの幅が大きくなってしまふ。期待値を大きくすればこの問題は当然緩和されるが、そのかわり集計時間が長くなる。上記のようなアルゴリズムで時間帯幅をランプ間 OD ペアごとに可変的に決定することにより、ピーク時であってもオフピーク時であっても期待値とゆらぎの関係を一定に保ったまま（ここでは揺らぎがおおむね期待値の 1/3 程度になる）、ピーク時には短めの、オフピーク時には長めの集計時間帯幅を設定できる。

高速道路上での突発事象発生時には、突発事象発生地点を通過するオンランプから高速道路を利用するルートを避けさらに下流のオンランプへと迂回するという傾向がある³⁾。そのような場合には、突発事象発生地点よりも下流では高速道路への流入交通が増加する。このような現象は平常時とは異なるランプ間 OD 交通量を発生させる原因となる。本研究では平常時の交通量の変化を分析することを主目的としているので、ランプ閉鎖による影響を受けたデータは除外したい。このような交通量の増大が発生する時間帯を決定するために、一般道路の代替経路を決め、その旅行時間 T_{local} を当該一般道路の平成 22 年度道路交通センサスの旅行速度データより求めた。いま、ランプ閉鎖時刻を T_{close} 、ランプ開放時刻を T_{open} とする。ランプ A におけるランプ閉鎖時間は T_{close} から T_{open} である。一方、ランプ A の閉鎖による迂回交通が下流のランプ B に到着する時間帯は $(T_{close} + T_{local})$ から $(T_{open} + T_{local})$ となる。ランプ閉鎖による影響の概略図を図-2に示す。以上により、

- ランプ A については、 T_{close} から T_{open} の時間帯のデータ
- ランプ B については、 $(T_{close} + T_{local})$ から $(T_{open} + T_{local})$ の時間帯のデータ

を除去すれば、ランプ閉鎖による交通量変動の影響をおおむね除去できる。なお、閉鎖されたランプより下流側に複数のランプがある場合は、それらすべてのランプのデータについてランプ B と同様の方法で除去した。

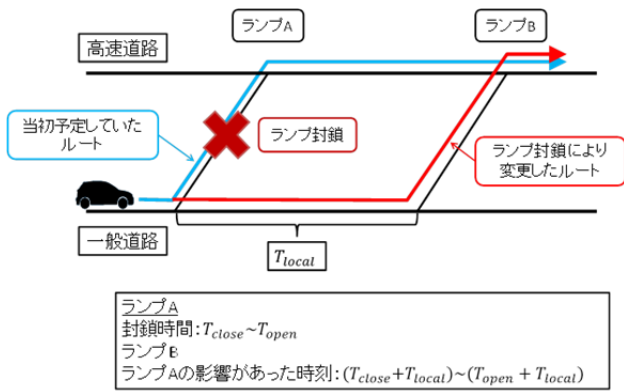


図-2 ランプ閉鎖の影響の概略図

表-1 各ランプ間ODペアの時間幅数と平均時間幅

ランプ間OD	距離[km]	時間幅数	平均時間幅[分]	時間幅の分散[分 ²]
月見山～西宮	22.6	33	27.636	90.110
若宮～西宮	21.3	28	32.857	59.980
湊川～西宮	19.3	22	40.591	130.151
柳原～西宮	17.4	52	16.577	10.706
京橋～西宮	14.0	76	11.013	33.329
生田川～西宮	12.8	80	10.325	16.919
摩耶～西宮	10.5	39	22.769	66.895
魚崎～西宮	5.9	25	37.400	320.960

時間帯決定アルゴリズムに沿って決定した時間帯幅を表-1にまとめて示す。時間帯幅が多いほどそのランプ間OD交通量が多いといえる。時間帯幅数が最も多くなったランプ間ODペアは生田川～西宮ペアであった。一方で、一番少なくなったのは湊川～西宮ペアである。平均時間幅がほとんど同じ湊川～西宮ペア、魚崎～西宮ペアを比べると標準偏差の値に大きな差があった。時間帯幅の標準偏差が大きいことは、交通量のオンピーク、オフピークとで交通量の差が大きいことを表している。また、平均時間幅の大きさはランプ間ODペアの交通量と関係する。すなわち、交通量が多いほど、時間帯幅が多く、平均時間幅が小さくなる。

3. 一般化線形モデルを用いた交通量変動分析

本節では、2節で決定した時間帯幅で集計した交通量とその時間帯幅の旅行時間を用いて分析を行う。各時間帯において観測される交通量は理想的にはポアソン分布に従う。しかし、ポアソン分布が厳密に成立するのであれば、各時間帯で集計した交通量に対して「平均＝分散」の関係が成り立ってはいくならない。実際のデータにおいてこのような関係が厳密に成立することは、たとえ適切なモデルと説明変数を使用してポアソン分布の母数を記述したとしてもあまり期待できず、実際には分散が平均より大きくなる現象（過分散）が多く観測される。したがって、時間帯交通量の観測度数をポアソン分布に従う分析は正確な推定結果を必ずしも導出しない。ここ

では、統計分布形として過分散を考慮に入れることが可能な負の二項分布⁴⁾をポアソン分布にかわって用いた⁵⁾。負の二項分布の確率密度関数は

$$f(y) = \frac{\Gamma(y)}{\Gamma(\theta) y!} \frac{\mu^y \theta^\theta}{(\mu + \theta)^{y + \theta}} \quad (1)$$

ただし

- y : 変数
- $\Gamma(\cdot)$: ガンマ関数
- μ : y の期待値
- θ : 形状パラメータ

と示される。この時、分散 σ^2 は式(2)のように表せる。

$$\sigma^2 = \mu + \frac{\mu^2}{\theta} \quad (2)$$

θ を十分大きくすれば式(1)はポアソン分布の確率密度関数になる。一方、 θ が小さいときには、式(2)からもわかるようにポアソン分布よりも分散が大きい分布となる。パラメータ推定の際同時に推定される θ は、過分散が大きい場合には小さく、過分散が小さい場合には大きく推定される。 θ が大きければ大きいほど、モデルの式が交通量の変動をよく記述できており、観測交通量のゆらぎが偶然性のみで説明できることを意味する。

パラメータ推定には一般化線形モデルを用いる。ランプ間OD交通量の観測分布が負の二項分布に従うとし、一般化線形モデルを構築し、モデルの各パラメータを最尤推定法より求める。ランプ間ODペア*i*について、各対象日*k*におけるランプ流入時間帯*t*を基準とし、実際に観測された交通量と旅行時間を Q_{ikt} 、 T_{ikt} であらわす。ランプ間OD交通量の期待値を μ_{ikt} を

$$\log \mu_{ikt} = \alpha_{it} + \beta_{it}^0 T_{ikt} + \sum_{m=\{MAR,AUG,DEC\}} \beta_{it}^m D_k^m + \delta_{ik}^{factor} \quad (3)$$

ただし

- D_{MAR} : 3月ダミー
- D_{AUG} : 8月ダミー
- D_{DEC} : 12月ダミー
- δ_{ik}^{factor} : 外的要因ダミー

とする。ここで、外的要因ダミーとは、分析対象期間の途中で、施策変更による交通需要の変化の影響を考慮に入れたダミー変数である。具体的には、月見山～西宮ペアについて、神戸山手線が開通した2010年12月16日、生田川～西宮ペアについては、神戸線と新神戸トンネルの連続利用による割引が開始された2011年4月1日以前は外的要因ダミーを0とし、以後はダミー変数を1とした。なお、式(3)の両辺を指数関数に代入することにより、ランプ間OD旅行時間が1分長くなった時のランプ間OD交

通量の減少率は $1 - e^{\beta_{it}^0}$ と表すことができる。以降の結果の表示にはこれを用いる。

ランプ間ODペアおよび時間帯ごとに計算した減少率の結果を図3～図10に示す。縦軸が減少率を表しており、正の大きい値をとるほど、ランプ間OD旅行時間が長くなるほどランプ間OD交通量が減少していることを示している。反対に、負の値を示すほど、ランプ間OD旅行時間が長くなると、ランプ間OD交通量が増加している。また、推定した $e^{\beta_{it}^0}$ のP値によってグラフのマーカーを変更した。◆：1%有意、●：5%有意、○：10%有意を示している。マーカーがついていない時間帯は β_{it}^0 を有意水準10%で検定を行っても有意な結果が得られなかった時間帯である。

結果の特性はランプペアごとにやや異なる。オンランプが月見山、京橋、およびこれらに位置するランプペア（あわせて5個）についてはほとんどの時間で少なくとも10%の有意水準を満たしている。また、6時に近い時間帯では有意な結果が得られないランプペアが多かった。いっぽう、生田川～西宮ペアでは、昼間の時間帯を除いては上記5つのランプペアと同様な減少率の変動を示している。一方でこのランプペアについては、昼間の時間帯で有意な結果が得られていない。以上の6つのランプ間ODペアについては、統計的に有意な時間帯におけるランプ間OD交通量の減少率は、ランプ間OD旅行時間が1分の長くなった時1～2%程度であった。また、減少率が負の値、すなわち交通量が多くなるという結果の時間帯は有意な結果が得られていない。

摩耶とそれより下流側を起点とするランプペアでは、ほかに比べて安定した結果は得られなかった。摩耶～西宮ペアについては、上記のランプ間ODペアよりも有意な結果が得られる時間帯の割合は少ない。有意水準1%で有意な結果を得られた時間帯は午前中に多く、昼以降は有意水準5%、もしくは有意な結果が得られなかった。減少率は2～4%程度と他のランプ間ODペアよりも大きな値となっている。さらに魚崎～西宮ペアについては、ほとんどの時間帯で有意水準10%でも有意な結果を得られなかった。一方で、夕方の時間帯では負の減少率が有意に出る結果となった。

ランプ間OD交通量の減少率はランプ間OD旅行時間が1分長くなった場合は、概ね1～2%程度であった。この減少率はランプ間ODペアの距離が短くなるほど増加していく傾向がある。また、生田川～西宮ペアの結果は旅行時間 T_{ikt} の係数 β_{it}^0 が検定の結果、有意である時間帯の数が他のランプ間ODペアに比べて少なかった。これらの結果は既存研究の分析結果と同様である。すなわち、高速道路利用者が旅行時間の情報をもとに高速道路の使用を決めているという結果であると考えられる。

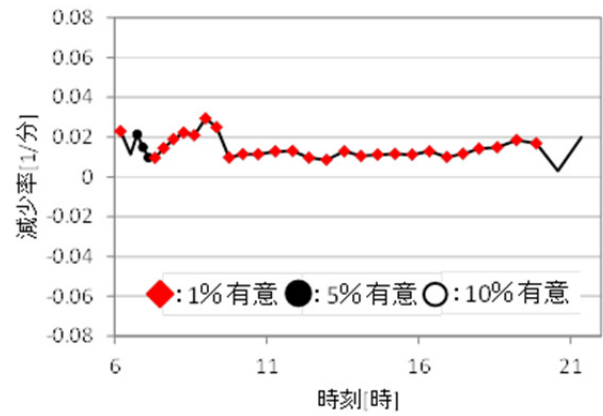


図3 減少率の変動図（月見山～西宮ペア）

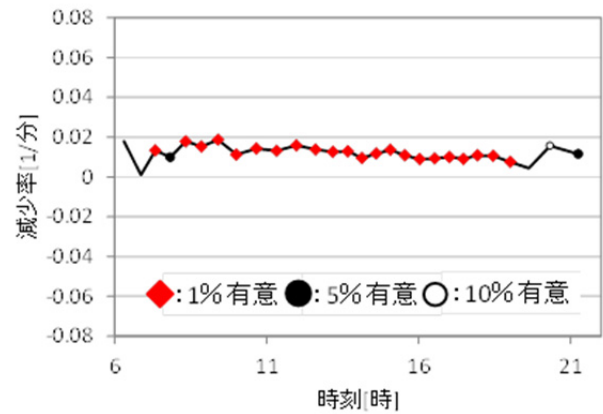


図4 減少率の変動図（若宮～西宮ペア）

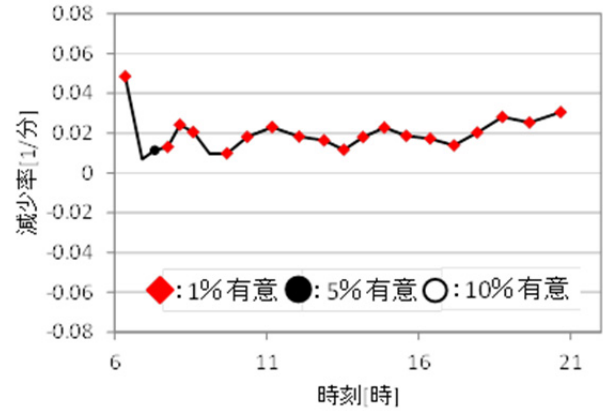


図5 減少率の変動図（湊川～西宮ペア）

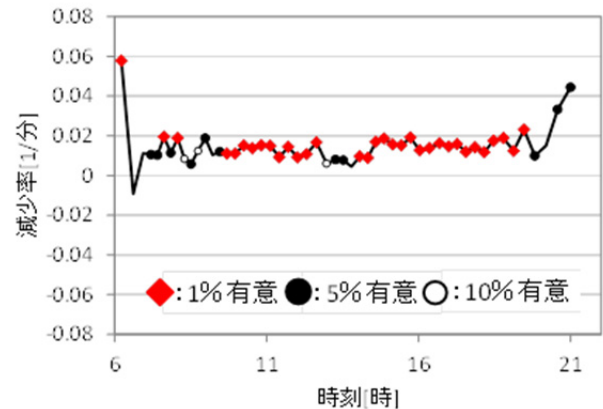


図6 減少率の変動図（柳原～西宮ペア）

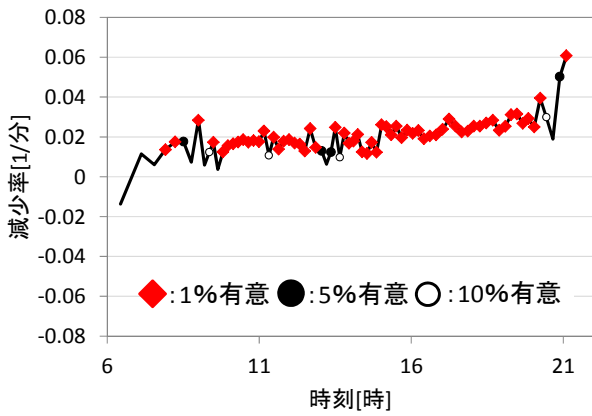


図-7 減少率の変動図 (京橋～西宮ペア)

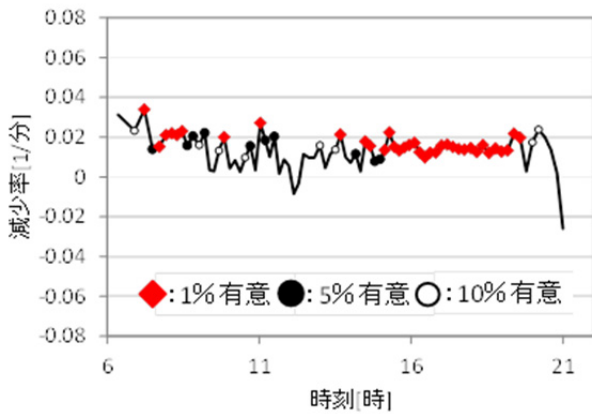


図-8 減少率の変動図 (生田川～西宮ペア)

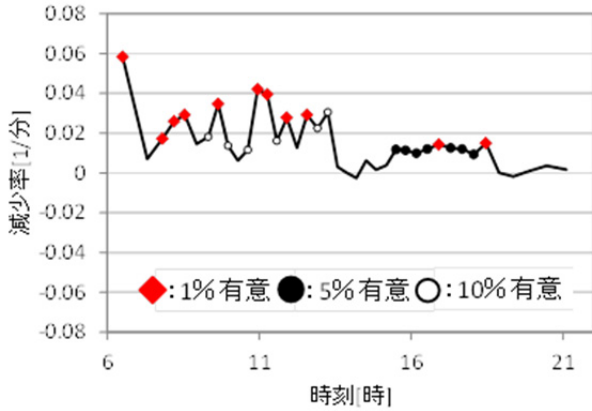


図-9 減少率の変動図 (摩耶～西宮ペア)

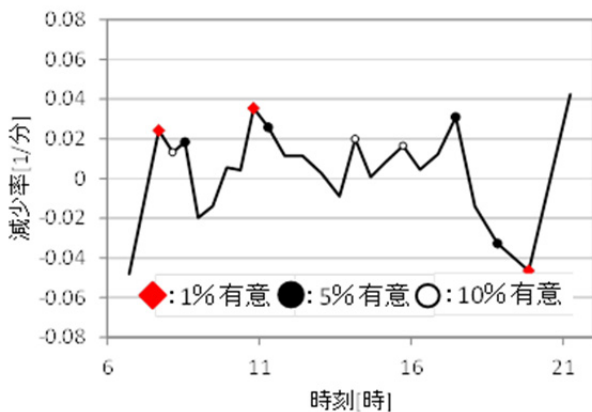


図-10 減少率の変動図 (魚崎～西宮ペア)

表-2 ダミー変数と等価な旅行時間
(11時～15時の平均値)

ランプ間ODペア	3月ダミー	8月ダミー	12月ダミー
月見山～西宮	-1.001	0.017	1.125
若宮～西宮	-2.793	6.688	-4.878
湊川～西宮	5.290	0.631	1.364
柳原～西宮	4.222	1.228	0.218
京橋～西宮	2.422	0.799	-0.971
生田川～西宮	2.449	2.048	3.261
摩耶～西宮	54.243	-10.440	111.390
魚崎～西宮	14.703	1.744	36.534

単位: 分

高速道路利用者はカーナビゲーションシステムのみならず、一般道路・高速道路を問わず設置されている情報板により旅行時間をリアルタイムに知ることが可能である。また、一定の利用頻度があれば、過去の経験に基づいて混雑を推測することも可能であろう。これらの情報や経験をもとに、高速道路を使用するかどうかを決めているということが推測できる。

式(3)に含まれる特定の月のダミーの大きさを見積もるために、これらの推定値を β_i^0 で除した値を表-2に示した。この値は、ダミー変数が1になることと等価な結果をもたらす旅行時間の増分に相当する。計算には各パラメータの点推定値を用いた。一部を除いてダミー変数の影響は数分程度であることがわかる。ランプ間ODペアによる差異に明確な傾向は見られない。これは、ランプ間ODペアによって、高速道路利用者の主利用目的が異なることが原因ではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究では、ETC-OD データを集計して求めたランプ間 OD 交通量とその旅行時間の関係について分析した。ランプ間 OD 交通量が従う統計分布を既存研究に基づいてポアソン分布とし、短時間ランプ間 OD 交通量とその時の旅行時間の関係を一般化線形モデルにより記述した。実際のデータにはポアソン分布の過分散を影響があることが考えられるので、それを考慮に入れることができる負の二項分布をランプ間 OD 交通量が従う統計分布として適用し、モデルのパラメータを推定した。

分析の結果、ランプ間 OD 旅行時間が1分長くなるときの交通量は1%～2%程度減少するということが分かった。この結果は既存研究のものと整合するが、本研究では既存研究の結果よりも統計的に有意な結果を得ることができた。これは、時間帯の幅を短めにすることで、混雑の影響を受けた車両のみを抽出して分析を行えた結

果であると考えることができる。また、交通量の減少率はランプ間 OD ペアの距離が短くなるほど大きくなる傾向にある。これは、高速道路利用者が高速道路上の混雑を嫌い高速道路の利用を避けるという行動をとっているからではないかと考えられる。特定のランプ間 OD ペアでは、ランプ間 OD 旅行時間とその交通量の間には旅行時間が長くなると交通量が減るという負の相関関係を有意な結果として得ることは出来なかった。このことより、ランプ間 OD ペアの特性も交通量変動に影響を与えているのではないかと考えることができる。

今後の課題を述べる。本研究ではランプ間OD交通量が従う統計分布がポアソン分布であるという立場のもとで分析を行った。実際には、ランプ間OD交通量の観測度数には過分散が発生しており、その影響を考慮するために負の二項分布を適用した。したがって、ランプ間OD交通量が従う統計分布についてより深い議論が必要であろう。本研究では平常時のランプ間OD交通量変動について一定の知見を得ることができた。今後はこの知見を活かし突発事象発生時の高速道路上での混雑への反応について分析することも可能である。本研究で得られた平常時のランプ間OD交通量変動の知見をより確かなものにしていくためには、他の路線についても分析を行う必要がある。高速道路が混雑すると高速道路を利用する車両が減少するという本研究の知見は、一般道路の混雑を増加させるかもしれないという見方もできる。したがって、本研究での知見と一般道路を含めた道路ネットワークを用いた交通シミュレーションを併せて行うことで、道路ネットワーク全体における混雑に対する影響を

分析することが可能となろう。様々なネットワークで一定の知見を得ることができたら、日常的な混雑の緩和、その結果として高速道路上におけるCO₂排出量の低下への取り組みといった環境問題などの道路ネットワーク管理に適用できる可能性も広がるであろう。

謝辞：本研究で利用した ETC-OD データは阪神高速道路株式会社よりご提供をいただいたものである。本研究は阪神高速道路株式会社および財団法人阪神高速道路管理技術センターからの協力を得てなされた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 上田大樹, 井料隆雅, 朝倉康夫, ETC 統計データを用いた旅行時間が ランプ間 OD 交通量に与える影響の実証分析, 土木計画学研究発表会・講演集, **46**, CD-ROM, 2012.
- 2) 小池真実, 井料隆雅, 朝倉康夫, 都市高速道路におけるランプ間 OD 交通量の短時間変動分析, 土木計画学研究発表会・講演集, **42**, CD-ROM, 2010.
- 3) 小篠耕平, 井料隆雅, 上田大樹, 検知器データを用いた突発事象発生時の流入交通量変動の可視化分析, 第 32 回交通工学研究発表会論文集, pp. 43-48, 2012
- 4) Zeileis, A., Kleiber C., and Jackman, S.: Regression models for count data in R, *Journal of Statistical Software*, **27**, pp. 1-25, 2008.
- 5) 粕谷英一 : R で学ぶデータサイエンス 10 一般化線形モデル, pp. 86-100, 共立出版, 東京都, 2012.

(2013. 5. 7 受付)

Empirical analysis of an impact of travel time on ramp-to-ramp traffic volume of an expressway

Hiroki UEDA, Takamasa IRYO, and Yasuo ASAKURA

The purpose of this study is to analyze time-dependent correlations between ramp-to-ramp travel time and the traffic volume from the long-term data obtained by ETC (Electronic Toll Collection System) in the network of Hanshin Expressway. Travel time is one of the important factors which influence traffic demand on the urban expressway. Thus, a quantitatively analysis on how the fluctuation of the travel time influences traffic demand will be useful to manage the expressway more efficiently. A few findings on relationship between ramp-to-ramp travel time and traffic volume has been known. However the time resolutions in these studies is low. This study uses ramp-to-ramp travel time and the traffic volume accumulated in shorter time interval. Number of vehicles counted in a shorter time interval basically does not follow the normal distribution but the Poisson distribution. Therefore, To perform a statistical analysis of the data following the Poisson distribution, the generalization linear model is used. As a result, it is revealed that, when ramp-to-ramp travel time becomes longer for one minute, traffic volume decrease about 1-2% of average traffic volume. This finding is consistent with the existing studies, whereas the statistical significance of this study is higher than these.