

# 通行料金政策の違いと日交通量系列の変動特性に関する統計分析\*

Statistical analysis on the difference in daily car traffic series in expressway under the different toll policy\*

井上真一\*\*・塚井誠人\*\*\*・桑野将司\*\*\*\*・奥村誠\*\*\*\*\*

By Shinichi INOUE\*\*・Makoto TSUKAI \*\*\*・Masashi KUWANO\*\*\*\*・Makoto OKUMURA\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

2009年度から導入された「休日1000円」制度は、かつて例をみない大幅な高速道路通行料金政策の変更であった。既に多くの報道がなされているように、政策導入後の休日には、発生地の遠方化による混雑時間帯の変化、および新たな混雑地点の発生など、利用交通量の時間的・空間的な分布が大きく変化している。

道路交通量の時間的な分布特性は、混雑緩和の観点から、その特性の解明とマネジメントが図られてきた。通行料金の変更は平均的な交通量を増加させるばかりではなく、むしろ、ピーク交通量の押し上げ効果が大きい。その場合、ピーク交通量の特性を解析するために、十分に安定した定常状態に対応する正規分布を前提とした分析手法を用いると、データ特性と分析手法のミスマッチによって、明確な分析結果が得られない可能性が高い。さらに利用交通量は、通行料金の変更直後に変化するばかりでなく、暦日や連続する休日に加えて、景気または季節などの周期的要因によっても変化する。したがって、通行料金政策が利用交通量に及ぼす影響を明らかにするためには、これらの複数の要因が交通量に及ぼす影響と、各要因の時間的な変化を長期的にモニタリングできる分析手法を用いる必要がある。

本研究では、本州四国連絡橋の複数のIC間の断面交通量を対象として、これまでの通行料金の変化や割引政策が利用交通量に及ぼす影響を分析する。具体的には、複数のIC間断面交通量系列に、独立成分分析(ICA:Independent Component Analysis)を適用して、交通量の変動傾向を表す原系列や、繁忙期や週末などの季節的な変動傾向を表す原系列を抽出し、通行料金政策が変更されたタイミングと比較して、その影響を明らかにする。また統計的な検定と、部分期間原系列の確率密度分布に関する統計量に基づいて、日交通量の変動特性を明らかにする。

\*キーワード: 発生交通, 交通量計測, ICA

\*\*学生員, 広島大学大学院工学研究科

\*\*\*正員, 博(工), 広島大学大学院工学研究科

\*\*\*\*正員, 修(工), 広島大学大学院工学研究科

(広島県東広島市鏡山1-4-1, TEL 0824-24-7849)

\*\*\*\*\*正員, 博(工), 東北大学アジア研究センター

(仙台市青葉区川内27-1)

## 2. データ概要

以下の分析では、しまなみ海道(7断面)、瀬戸中央自動車道(1断面)、および神戸淡路鳴門自動車道(2断面)について、2002年(平成14年)1月1日~2008年(平成20年)10月31日の2496日間に渡る日交通量データを用いる。このデータは、軽自動車、普通車、中型車、大型車、特大車の5車種別に集計されているが、本研究では5車種を合計した1系列について、分析を行った。

観測期間中に行われた通行料金の改定のうち、本研究では、全IC区間に影響を及ぼしたと考えられる、(A)2003年7月1日から開始された全区間の値下げ政策(1区間概ね500円程度)、(B)2005年7月1日から開始されたETC割引政策(概ね30%割引)に着目して、これらの政策実施時点の前後について、原系列の変化を検証する。

## 3. 本研究で適用する分析方法の概略

### (1) 独立成分分析

独立成分分析は多変量解析手法の1つであり、主成分分析や因子分析と同様に、変数を内生変数/外生変数に分類することなく、データの挙動をより少数の変数に縮約して表現するための統計手法である。 $n$ 区間の観測交通量のうち、区間 $i$ の $t$ 日の観測系列を $x_i(t)$ とする。ここで $x_i(t)$ は、複数の原系列 $s_j(t)$ が日付 $t$ によらない重み $a_{ij}$ を係数とする重ね合わせによって観測される、と考える。このとき、全IC区間 $i$ について、以下の式(1)、および、行列表示(2)が成り立つ。

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^k a_{ij} s_j(t), \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{s} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{s}$ は、それぞれ観測交通量 $x_i(t)$ 、混合係数 $a_{ij}$ 、および原系列 $s_j(t)$ のベクトル表示を表す。以下 $\mathbf{A}$ を混合行列と呼ぶ。

独立成分分析は、 $s_j(t)$ の独立性を仮定して、観測交通量 $x_i(t)$ を複数の原系列 $s_j(t)$ に分解すると同時に、各原系列の各日の流出交通量に対する寄与を表す混合係数 $a_{ij}$ を求める方法である。Hyvarinenら<sup>1)</sup>は独立性の指標

として、式(3)に示す尖度(4次統計量)の絶対の最大化を目的関数とした FastICA アルゴリズムを開発した。

$$kurt(y) = \frac{E[y^4]}{(E[y^2])^2} - 3 \quad (3)$$

尖度は確率密度分布の裾の厚さを表す指標である。標準正規分布の尖度は0なので、分布の裾が厚い(優正規的)とき正の値を、また、分布の裾が薄い(劣正規的)とき、負の値をとる。

なおICAでは、高次モーメントの抽出をスムーズに行うため、原系列の平均(1次モーメント)が0となるように、観測交通量系列からそれぞれの平均値を差し引く中心化を行う。また式(1)が示すように、原系列のスケールと混合係数のスケールは相殺するため、不定となる。そこで原系列の分散は全て1に固定して、原系列のスケール情報は、全て混合係数に集約する。さらに式(1)は、抽出される原系列の順序が不定であることも表している。そこで、観測交通量に対する寄与が最も大きい原系列から順に $s_1, \dots, s_n$ と標記する。

## (2)原系列の変化点の分析

式(3)で定義した尖度の定義より、原系列に含まれる正、または負のピークの出現頻度が多い、または出現する値の絶対値が大きければ、尖度は大きな値をとる。以下の分析では、尖度を持つ以上の性質に着目して、原系列から、一部の期間を切り出した部分原系列の尖度を計算することによって、

10個の原系列のうちの1つについて、ある時点(日付) $t$ 以降の365日分の系列 $s_i(t) \sim s_i(t+364)$ を抽出する。

$s_i(t) \sim s_i(t+364)$ の部分原系列について、平均0、分散1となるように規準化を行う。

抽出した時点 $t$ に関する尖度を計算する。

時点 $t$ を1日ずらしながら～の手順で繰り返し計算を行う。

10個の原系列について～の計算を繰り返す。

なおこの分析では、各時点 $t$ から364日後までの部分原系列を取り扱うため、および観測終了日以前の365日分の時点については分析できない。

## 4. 分析結果

### (1)観測交通量に対するFastICAの適用

各IC区間の日交通量を1系列とした、10系列の観測交通量に対してFastICAを適用して、10個の原系列と混

合係数を算出した。紙面の都合上、 $s_1, s_4, s_8$ の日交通量分布を、それぞれ図1に示す。また表1に、各原系列の平均、分散、歪度(3次統計量)、尖度を示す。表1より、各原系列の平均は0、分散は1に基準化されていることが確認できる。分布の歪度は、 $s_5$ を除いて正であり、右(正の方向)に裾を引く分布形である。表2より、混合係数はほぼ正なので、式(1)より、原系列の正のピークは、観測交通量のピークに対応する。また尖度については、 $s_8$ のみが負の値を示す劣正規分布であり、その他は全て優正規分布となった。図1より、 $s_8$ の日分布はピークを持たず、経年的に緩やかに増加する傾向を示している。一方、その他の原系列については、図1の日分布より、特定の期間に大きなピークを示している。

表2に、個々の混合係数が統計的に0か否かの検定を適用した検定の結果を示す。なお検定に際しては、各原系列 $s_i$ が観測交通量に有意な影響を及ぼしているか否かを判定するため、Bonferoni修正法を用い、各混合係数の有意水準を $5\%/10=0.5\%$ と調整した。

表2の混合行列より、 $s_1 \sim s_7$ は全架橋断面に共通する交通量成分であり、ピークは正月・GW・お盆( $s_1$ )、毎年のGW( $s_2$ )、2006年5月2日( $s_3$ )、お盆(8月12日または13日、 $s_4$ )、負のピーク(それぞれ台風または積雪に対応、 $s_5$ )、1月1日( $s_6$ )、7月第4週～8月第1週頃まで( $s_7$ )であった。また $s_8$ は、しまなみ海道にのみ寄与し、その日交通量分布は緩やかな増加を示していた。 $s_9$ はしまなみ海道の一部、および神戸淡路鳴門自動車道への寄与がみられ、その日交通量分布は日曜日が最大となる週間変動を示している。 $s_{10}$ は、しまなみ海道の最も四国寄りである馬島～今治北区間にのみ寄与がみられ、日交通量分布は毎年の5月中旬の週末にピークを示していた。表3に各原系列のピーク発生時期を示す。

表1 各原系列の平均、分散、歪度、尖度

	平均	分散	歪度	尖度
$s_1$	0.000	1.000	2.532	17.010
$s_2$	0.000	1.000	4.162	34.317
$s_3$	0.000	1.000	2.740	20.275
$s_4$	0.000	1.000	5.498	75.284
$s_5$	0.000	1.000	-1.562	24.117
$s_6$	0.000	1.000	6.161	66.322
$s_7$	0.000	1.000	2.001	14.712
$s_8$	0.000	1.000	0.168	-0.398
$s_9$	0.000	1.000	0.862	1.492
$s_{10}$	0.000	1.000	4.980	52.706

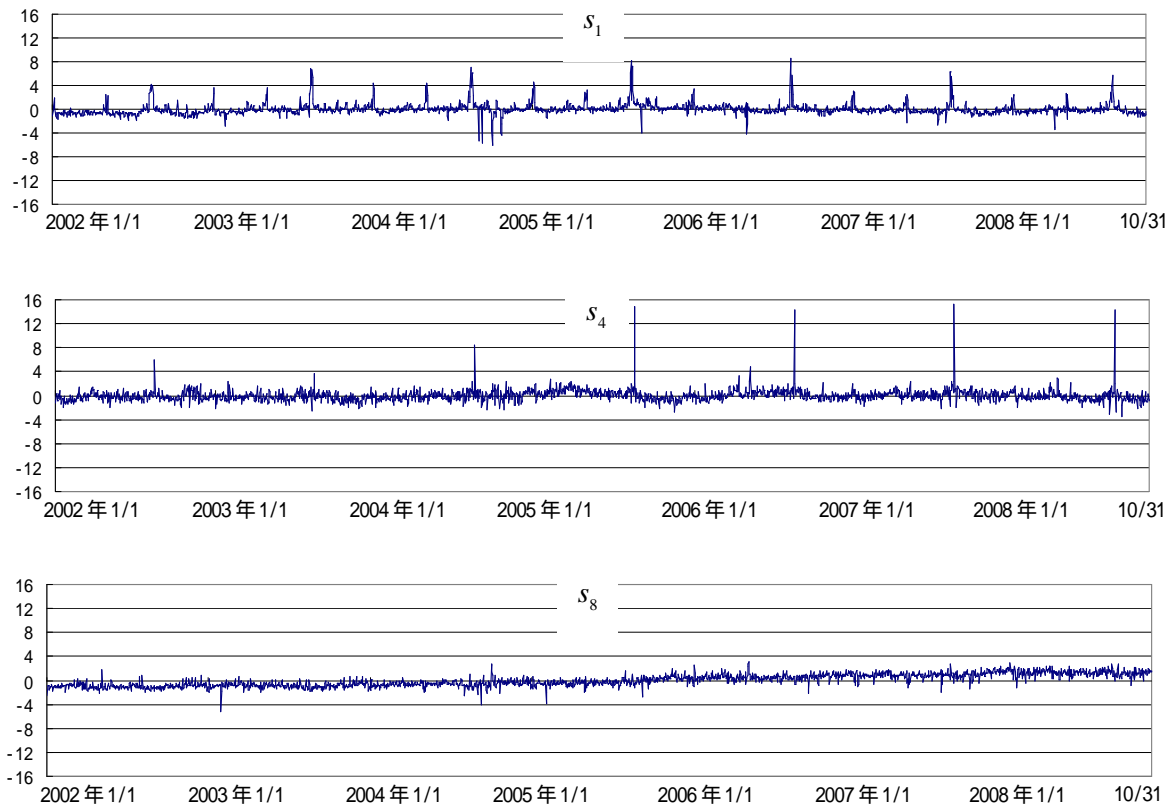


図1 原系列 $s_1, s_4, s_8$

表2 混合係数の推定結果

	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$
<しまなみ海道>										
向島本線～向島	1223.70 *	1288.16 *	734.98 *	502.54 *	355.77 *	425.89 *	288.36 *	933.98 *	261.68 *	44.49
向島～因島北	1255.34 *	1375.12 *	639.46 *	507.40 *	350.41 *	369.24 *	284.78 *	924.83 *	136.60 *	21.13
因島南～生口島北	955.49 *	1150.84 *	646.79 *	425.68 *	196.27 *	325.69 *	147.97 *	576.87 *	-141.53 *	-25.96
生口島南～大三島	832.49 *	1148.50 *	636.38 *	362.17 *	176.40 *	436.89 *	97.67 *	313.81 *	235.16 *	71.94
大三島～伯方島	802.04 *	1104.15 *	510.54 *	404.47 *	164.64 *	552.32 *	66.05	327.27 *	55.29	65.22
伯方島～大島北	801.06 *	1101.58 *	509.40 *	544.19 *	177.95 *	471.81 *	87.34 *	410.27 *	74.30	77.30
馬島～今治北	798.45 *	1146.63 *	564.04 *	505.19 *	186.21 *	466.22 *	119.07 *	428.70 *	108.59 *	298.17 *
<瀬戸中央自動車道>										
児島～榑石	2258.20 *	2250.36 *	906.27 *	862.20 *	1263.12 *	791.10 *	7.74	35.11	-15.61	-44.57
<神戸淡路鳴門自動車道>										
垂水～淡路	5363.57 *	4296.92 *	2386.71 *	2048.08 *	1500.52 *	1489.69 *	1846.45 *	223.09	1229.94 *	243.27
淡路島南～鳴門北	4222.01 *	3028.46 *	1582.93 *	1525.49 *	1017.82 *	1034.83 *	420.31 *	155.17	623.81 *	87.97

\* Bonferoni 修正法により, 各 $s_j$  に対して有意水準 5%

表3 原系列のピーク発生時期

$s_1$	正月, GW, お盆
$s_2$	GW
$s_3$	2006年5月2日
$s_4$	お盆の変動特性
$s_5$	2004年7月30日, 12月30日, 2005年9月5日
$s_6$	正月
$s_7$	7月第4週～8月第1週
$s_8$	経年的な増加傾向(しまなみ海道)
$s_9$	日曜日(曜日変動特性)
$s_{10}$	5月第3日曜日(しまなみ海道:馬島～今治北間)

## (2)原系列の変化点の分析

得られた 10 個の原系列それぞれについて, 2003 年 1 月 1 日～2007 年 10 月 31 日の各時点における将来 365 日分の部分原系列の尖度を計算した. 紙面の都合上,  $s_1, s_4, s_8$  の結果を図 2～図 4 に示す. なお表 1 より,  $s_1, s_4, s_8$  の歪度はいずれも正であるので, 分布は右に裾を引く形である. よって尖度に貢献する成分は正のピークである. したがって, 図 2～図 4 において時点 $t$ で尖度が大きくなっている場合, 「 $t$  以後のピークが高くなった」ことを, また小さくなっている場合, 「 $t$  以後のピークが低くなった」ことを意味する.

図 2 より, 各年の正月, お盆, GW にピークを示す  $s_1$  の尖度の変化をみると, 経年的にやや増加傾向にある.

しかし, 図 3 のお盆にピークを示す  $s_4$  と比較すると, その変化率は非常に小さい. なおここで結果については省略しているが, 大型連休にピークを示す  $s_2, s_3, s_6$  と比較しても, その変化率は小さい. よって  $s_1$  は, 2002

年～2008年の大型連休の平均的な需要変動を表し、かつこの連休の変動は経年的にはやや増加傾向にあると解釈した。なお $s_1$ の尖度は、通行料金政策の変更後で大きな変化はみられない。

図3より、お盆にピークを示す $s_4$ の尖度は、各年のお盆の時期を境に変化がみられる。特に、2003年8月16日、および2004年8月16日で急激に増加している。すなわち2003年および2004年のお盆のピークは、前年と比較して急激に増加している。2003年と2004年を比較すると、2004年の方が尖度の上昇幅が大きい。通行料金政策開始日と比較すると、これらのピークの変化は、2003年7月1日の通行料金割引政策の影響を受けたものと考えられる。なお $s_4$ の尖度は、2007年8月14日で急激に低下しているが、これは2008年8月付近の暦月配置による、需要急減日が含まれるためと考えられる。

図4より、しまなみ海道の増加トレンドを示す $s_8$ の尖度は、2002年1月29日、2003年1月30日に小さい変化がみられる。図2、図3の比較から明らかなように全期間を通じて変化はみられない。 $s_8$ は特定のピークをもたない原系列であるため、部分原系列の尖度に大きな変化が現れなかったと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、本四連絡架橋断面交通量にFastICAを適用し、得られた混合係数に統計的検定を適用することで、各架橋に特有の原系列を抽出した。また得られた10個の原系列それぞれについて、尖度を用いた変化点の分析を行った。

観測交通量を分解した結果、大型連休にピークをもつ原系列 $s_1, s_2, s_3, s_4, s_6$ や、またしまなみ海道の増加トレンドを示す $s_8$ 、および曜日変動を表す $s_9$ が得られた。またこれらの原系列の変化点を分析したところ、 $s_1$ は大型連休の平均的な需要変動を表していることが明らかとなった。この原系列は経年的にやや増加傾向にあるものの、通行料金変更日との関係は明確でなかった。またお盆の変動を表す $s_4$ は、( )2003年7月1日の全区間値下げ政策料金政策開始日直後の2003年、および2004年のピークが増加しており、2003年7月1日から施行された通行料金割引政策の影響を受けていることが明らかとなった。

今回は得られた原系列のピークにのみ着目して分析を行ったが、この方法ではピーク発生日以外の日常時の細かい交通量の変動を分析できない。よって今後は、この交通量変動の誤差成分を抽出する、noisyICAを適用した観測交通量の分析を試みたい。

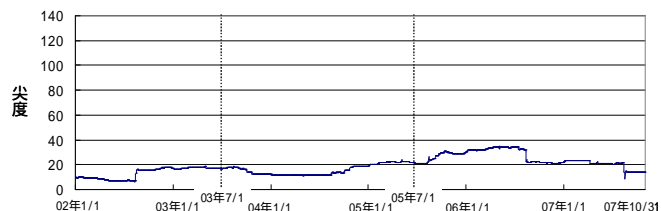


図2  $s_1$ の尖度変化時点

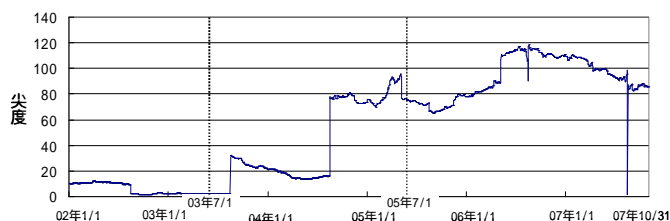


図3  $s_4$ の尖度変化時点

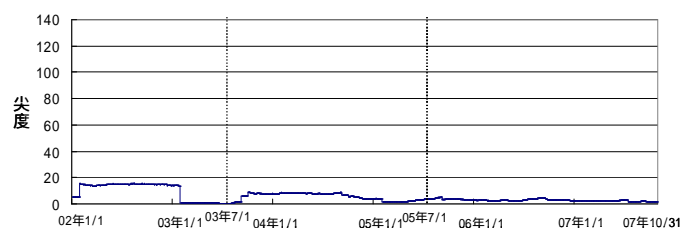


図4  $s_8$ の尖度変化時点

## 参考文献

- 1) Aapo Hyvarinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. : [詳解] 独立成分分析, 東京電機大学出版局, 2005
- 2) Shohei Shimizu, et.al : Testing significance of mixing and demixing coefficients in ICA, In Proc. International Conference on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA2006), Charleston, SC, USA, pp.901-908, 2006
- 3) 永田靖・吉田道弘: 統計的多重比較法の基礎, サイエンス社, 1997