阪神高速道路の時間交通量の確率的特性に関する基礎的分析*

An analysis of stochastic properties of hour traffic volume of the Hanshin Expressway*

稲田裕介**・中山晶一朗***・高山純一****

By Yusuke INADA**・Shoichiro NAKAYAMA***・Jun-ichi TAKAYAMA****

1. はじめに

近年のETCの普及や道路の周辺環境の変化を考慮して, 高速道路会社は多くのETC社会実験施策を実施している．このような施策の立案には，現段階での交通の状況を知る必要があるが，そこに用いられるデータは一時点の交通量の平均値である場合が多い.

現在，道路の運用・管理といった面で交通量の変動を考慮した考え方が見直されている．交通量変動の1つとして考えられる確率的性質については,“交通量がどのような確率分布に従っているのか”というような基本的な問題を含めて，いまだ未知の部分も多いのが現状であると考えられる．交通量の変動特性がどのような確率分布形に従うのかを知ることができれば，交通量を確率論的に取り扱えるようになり，変動を考慮した信頼性評価や道路の運用・管理・計画に役立てられよう．さらに，交通量変動を考慮した交通需要推計モデルの構築等へも役立てられる可能性もあると思われる.

そこで，本研究では，2003年3月1日～2007年5月31日までの阪神高速道路全線の路線上に存在するトラフィックカウンターが観測した交通量データを用い，交通量特性を統計学的に分析する．その分析結果を使い，阪神高速道路のネットワーク評価を行うための基礎である確率分布特性について把握することを目的とする.

２．研究内容

(1) 分析対象データ

今回研究に用いたデータは，阪神高速の本線およびランプ部分における交通量データである.データの内容は, 2003年3月1日から2007年5月31日(1553日間)において，阪神高速全線の車両感知器により観測された時間交通量データである.

なお，不要なデータやエラーカウントについては，除去した後,分析を行うこととした.詳細は講演時に示す.

不要な観測地点を取り除いた残りの観測地点は合計867箇所となった．内訳は本線上485箇所，ランプ上361箇所, 料金所14箇所, パーキングエリア入口部分7箇所である.

(2) 時間交通量に関する統計量の算出

それぞれの観測地点の時間交通量を，時間帯別に，1.平日(月-金)，2.土曜，3.日曜祝日(特異日も含む)の3つに分類し, それぞれを対象とした統計諸量(最大値, 最小値, 平均値，中央値，最頻値，標準偏差，変動係数，尖度，歪度)の算出を行った．なお，最頻値の算出に関して，次節の**式(1)**で表わされる階段状の分布関数の傾きが最大となる区間の中央値をもって表現した．**図3**において縦軸の間隔を固定したとき，傾きが最大となるためには横軸の間隔を最小にする必要がある．今回は，昇順に並べられたk番目の交通量と，それよりi番目に大きい交通量との差が最小となるとき，両者の中間の*(k+i)/2*番目交通量を最頻値とした.

尖度，歪度の補足説明をする．尖度は，確率密度関数の尖り具合, 裾の重み具合を調べる統計学の指標であり, 正規分布のものは 0，正規分布より裾に重みが生じる分布(とがっている分布)では，尖度は0より大きな値をとる．また，歪度は，分布の非対称性を示すものである.正規分布は，左右対称となるため歪度は0の値をとる.一般に，正の歪度をもつ分布は，右に偏った形となり，逆に，負の歪度をもつ分布は，左に偏った分布となる.歪度が1以上の分布は，正規分布と有意な差があると判断できる.

算出された項目について，最大値，最小値，中央値，平均値は横軸に時間，縦軸にそれぞれ交通量をとったグラフを作成した．標準偏差，変動係数も同様のグラフ化を行い，尖度，歪度については時間ごとに全地点のそれをヒストグラム化して検証を行った．グラフ化したものの詳細は発表時に示す.尖度, 歪度の結果を以下に示す.

尖度は，平日・土曜・日曜祝日の違いによって，時間帯の違いによって，多少の誤差が存在するが，おおよそ

*キーワード：交通ネットワーク分析

**学生員，金沢大学大学院自然科学研究科

(石川県金沢市角間町，E-mail：yskysk@stu.kanazawa.ac.jp)

***正会員，博(工)，金沢大学環境デザイン学系

(TEL：076-234-4614，E-mail：snakayama@stu.kanazawa.ac.jp)

***フェロー会員，工博，金沢大学環境デザイン学系

(TEL：076-234-4613，E-mail：takayama@stu.kanazawa.ac.jp)

図１のような形のヒストグラムが多く確認できた．**図１**は山の頂上が約 0.5 であり，左に偏った分布である．ここから，交通量分布が，正規分布よりも尖った分布が多く存在することが概念的にいえる．また，同地点・同時刻の交通量の分布が，日によって多少の違いが存在するが，平均値から大きく離れたものは多く存在しない結果がいえる．

同様に，歪度の分布例を**図２**に示す．これも各時間において多く確認されたもので，山の頂上が約 0.1 で中央からやや右よりの分布であることがわかる．多少の差は存在するが，他の時間での結果も，山の頂上が約 0.1 から 0.3 に収まるような傾向が見られた．ここから，交通量の分布が平均値よりもやや右に膨れた地点が多いことがいえる．

6 時台をはじめとする交通量の少ない深夜時間帯などでは**歪度**分布は尖ったものとなる傾向がみられた．一方，交通量が多くなる昼間時間帯では**歪度**の値が分散する傾向がみられた．つまり，昼間時間帯では，交通量の分布形の左右非対称具合が，深夜時間帯に比べ，顕著になることがいえる．

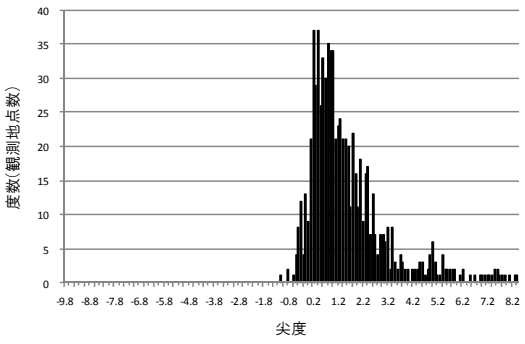

図１ 平日の 9 時　全地点における 尖度の分布

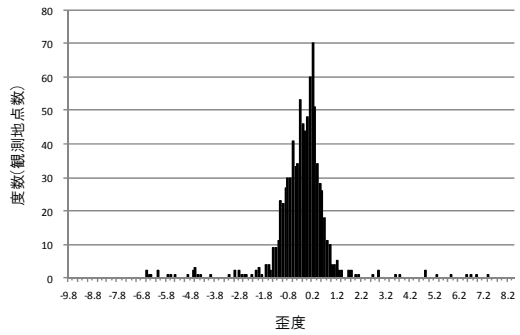

図２ 平日の 6 時　全地点における歪度の分布

(3) 年ごとの交通量の差の検定

研究データは 2003 年 3 月 11 日から 2007 年 5 月 31 日までの 4 年 3 か月分のデータである．4 年 3 か月というデータの多さを考えると，この期間内に交通量がある程度変化している可能性が考えられる．そこで，このデータを年ごとに 5 つに分け，それぞれの年の交通量に有意な差が存在するか検証した．検証には 1 元配置分散分析を用いた．平日，土曜，日曜・祝日の各時間の，地点 867 か所を対象とした結果を以下の**表１**に示す．なお，分析では有意水準は 5%としている．

表１　年ごとの差の検定結果(時間交通量，α=0.05)

時間	差がないとされる地点数			割合(%)		
	平日	土曜	日曜祝日	平日	土曜	日曜祝日
0時	61	154	167	7.04	17.76	19.26
1時	99	162	209	11.42	18.69	24.11
2時	74	270	316	8.54	31.14	36.45
3時	53	231	354	6.11	26.64	40.83
4時	34	168	408	3.92	19.38	47.06
5時	45	191	445	5.19	22.03	51.33
6時	14	193	574	1.61	22.26	66.21
7時	18	179	576	2.08	20.65	66.44
8時	21	210	449	2.42	24.22	51.79
9時	38	192	461	4.38	22.15	53.17
10時	49	261	479	5.65	30.10	55.25
11時	40	270	497	4.61	31.14	57.32
12時	46	290	446	5.31	33.45	51.44
13時	46	224	423	5.31	25.84	48.79
14時	41	244	387	4.73	28.14	44.64
15時	43	287	362	4.96	33.10	41.75
16時	50	272	358	5.77	31.37	41.29
17時	36	235	355	4.15	27.10	40.95
18時	36	218	343	4.15	25.14	39.56
19時	38	288	336	4.38	33.22	38.75
20時	36	163	274	4.15	18.80	31.60
21時	49	116	300	5.65	13.38	34.60
22時	67	99	181	7.73	11.42	20.88
23時	52	75	182	6.00	8.65	20.99

表１より，年ごとに差が認められない地点数は小さな値をとっている．平日のそれは，土曜，日曜祝日に比べさらに小さなものとなっている．ここから，分析を行ううえでは，データをすべての日数分使うより，年ごとに分け分析を行ったほうが信頼性の高い結果が導けるであろうと推測できる．

(4) K-S 検定を用いた確率分布形の適合度検定

平日と土曜，日曜祝日を分け，各時間・各観測地点の交通量分布を示した結果，**図 4** のように正規分布に近い形の交通量の分布が多く確認できた．一方で，**図 5** のような分布も少ないながら観測された．本研究では，時間交通量の確率分布形が正規分布に従うのか判断するため，正規性判定の検定を K-S **検定**（Kolmogorov-Smirnov Test）を検定手法に用い行った．この K-S **検定**は，実測分布(確率密度関数)が理論分布に従うかどうかを，**図 3** のように累積確率分布として表わし，理論分布(正規分布の分布関数)との差の最大値 $D_{\max}$ と検定統計量 D_n^{α} の大小をもって判定を行う．$D_{\max} < D_n^{\alpha}$ となるとき，その分布の正規性が認められる．なお，**図 5** において階段状の分布が実測値の累積確率分布 $S_n(x)$ を表しており，次の**式**(1) を用いて表すことができる． なお，式(1)において， x_k は

n 個の観測交通量 x を昇順に並べたとき，k 番目にあたる交通量である．

$$S_n(x)=\begin{cases}0 & (x<x_1)\\ k/n & (x_k\le x<x_{k+1})\\ 1 & (x\ge x_n)\end{cases} \quad (1)$$

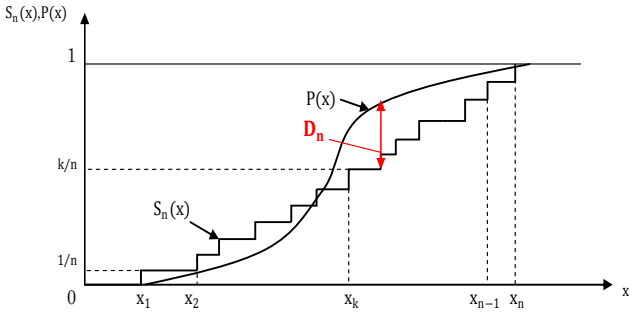

図 3 累積確率分布と累積理論曲線

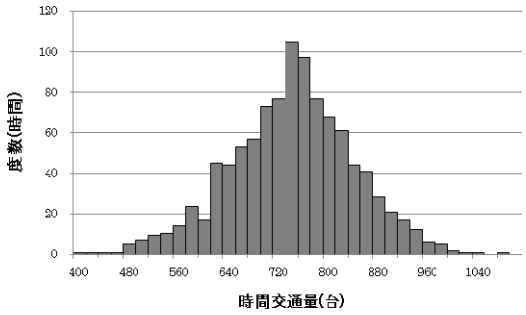

図4　平日7時　池田線下り18.6km

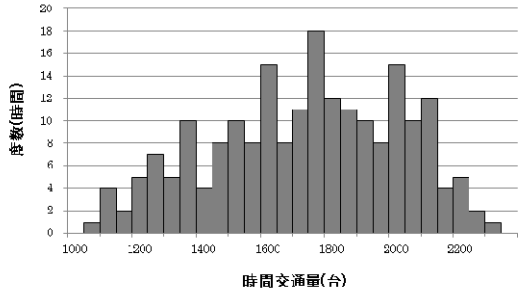

図５　土曜19時　　池田線上り8.6km

データが少なくとも順序づけ可能な場合には，χ^2 検定よりも K-S 検定の方が適合度検定に用いる方が正しいのではないかと考えられている．また，K-S 検定は χ^2 検定に比べて，データを各区間に分ける必要がない，分布の裾のデータが少ない場合は影響しにくい，など利点を持つ．

表 2 にこの結果を示す．時間帯別に正規性の検定を行ったところ，有意水準 5%にて，平日ではほぼすべての時間，全体の約 50%未満の観測地点で，正規性が認められた．土曜においては，同様にで全体の 80%以上の地点で正規性が認められた．日曜祝日では，夕方時間帯で 70%前後の地点で正規性が認められた一方，朝時間帯の正規性は，20%前後と非常に低い値を観測した．

土曜の正規性に比べ，日曜祝日と平日の正規性は低い結果である．平日のそれは特に小さなものとなっていることから，以下これについて考察を行う．

表 2　平日の全観測地点の正規性

	α=0.05		α=0.01	
	全観測地点 正規性あり	867 割合	全観測地点 正規性あり	867 割合
0時	167	19.3	265	30.6
1時	164	18.9	246	28.4
2時	146	16.8	209	24.1
3時	180	20.8	267	30.8
4時	320	36.9	436	50.3
5時	365	42.1	477	55.0
6時	387	44.6	511	58.9
7時	194	22.4	303	34.9
8時	249	28.7	353	40.7
9時	267	30.8	385	44.4
10時	239	27.6	364	42.0
11時	242	27.9	355	40.9
12時	289	33.3	429	49.5
13時	317	36.6	442	51.0
14時	266	30.7	405	46.7
15時	249	28.7	366	42.2
16時	264	30.4	368	42.4
17時	277	31.9	375	43.3
18時	243	28.0	359	41.4
19時	208	24.0	323	37.3
20時	87	10.0	174	20.1
21時	156	18.0	283	32.6
22時	112	12.9	243	28.0
23時	92	10.6	206	23.8

平日の正規性が低い原因としてデータ量の多さが影響している可能性がある．しかし，平日の正規性が低いのには，別の要因も考えられる．

まず，考えられるのは二つ山のヒストグラムの存在である．これは，深夜，大阪市都心やその周辺地域での本線やランプ部分で多く確認できた．同時間帯，同地点の交通量データを見ると，月曜日 0～4 時位（日曜深夜）の交通量がほかの曜日（火，水，木，金）の交通量にくらべ小さな値をとっていることが確認できた．このように日曜深夜時間の交通量が平日深夜の正規性に影響しているものと考えられる．同時間帯，同地点周辺では二つ山にならずとも，左右に膨れたヒストグラムが確認できた．これも同じ原因が考えられ，この場合は，日曜深夜交通量と他の曜日の交通量の差異が少ないながら存在していることが考えられる．

また，交通量の少ない時間帯での，利用の少ない路線（北神戸線・神戸山手線など），特にランプ部分ではヒストグラムを描いたとき，交通量が少ないため（階級数が少ないため）正規性のない分布が多く確認された．これが少なからず影響しているものと考えられる．

交通量の小さい深夜時間帯で，平日や日曜祝日の正規性が低下しているのには何か別の要因が考えられる．各曜日の変動が正規性に影響を及ぼすのか，正規性の低い平日の交通量を各曜日（月曜～金曜の 5 つ）に分け，再び曜日ごとの検定を行った．その結果を，正規性が認められた地点と，K-S 検定の計算過程で算出された検定統計量にわけ，下の**表 3** に結果を記す．

表 3　各曜日・正規性が認められた地点割合

	正規性(全地点867箇所対象)				
	月曜	火曜	水曜	木曜	金曜
0時	44.5	63.7	67.0	80.3	82.0
1時	60.3	57.9	59.4	73.4	75.0
2時	65.3	58.4	62.3	74.0	79.8
3時	73.5	65.1	69.7	80.7	83.7
4時	78.5	76.7	71.6	84.5	85.1
5時	86.1	80.2	79.1	87.3	89.9
6時	86.5	77.5	82.6	87.1	89.5
7時	61.8	66.2	64.0	75.2	81.3
8時	67.5	64.9	67.5	74.0	78.9
9時	63.5	67.9	72.2	78.8	81.4
10時	57.0	70.1	71.7	81.0	80.6
11時	54.0	68.7	66.9	74.2	75.4
12時	72.5	74.6	78.4	88.2	85.4
13時	71.8	75.2	82.8	87.4	85.9
14時	67.0	72.0	76.4	85.8	80.9
15時	61.2	73.7	75.5	82.5	82.1
16時	65.5	70.0	72.7	84.8	82.1
17時	63.1	67.6	74.4	80.7	78.5
18時	62.3	72.2	76.7	81.3	81.4
19時	76.1	73.0	71.3	85.8	88.1
20時	58.6	62.1	61.2	82.0	88.7
21時	69.8	65.3	62.7	76.7	83.5
22時	68.1	65.4	61.1	76.6	84.7
23時	71.4	69.6	66.7	86.6	91.9

これをみると，分けた後の方が各曜日とも，正規性の向上が見られた．

次に，**表 4** に正規性が認められた地点割合の“終日”と“昼間 12 時間”の平均値を示す．

環状線やそれにつながる路線では，昼間 12 時間平均値のほうが正規性の低下がみられた．一方，それ以外の 4 号湾岸線や 5 号湾岸線では，終日平均値と昼間 12 時間平均値では正規性にあまり変化が見られないか，大きくなる傾向がみられた．一概には判断できないが，大阪都心部からの放射路線では，昼間に正規分布と行った交通量分布が多く存在すると考えられる．

表 4 正規性のある地点割合(全感知器)

路線名	有意水準 α			
	0.05	0.01	0.05	0.01
	全日平均値		昼間12時間平均値	
池田線	78.0	86.5	72.5	82.7
環状線	56.9	66.9	32.2	43.8
守口線	43.2	54.0	10.8	21.9
東大阪線	69.0	80.8	67.0	80.5
松原線	63.7	79.4	53.8	68.8
堺線	76.4	86.5	70.1	82.6
神戸線	75.5	86.8	68.6	84.9
4号湾岸線	86.4	93.8	90.9	97.2
5号湾岸線	80.4	88.2	90.1	94.7

(5) 平均値と分散の関係式

飯田ら[2]の研究では，交通量の平均値と分散の間には，以下の**式 (2)** のような指数関係が成立することが示された．

$$\sigma^2 = \alpha \cdot \mu^{\beta} \qquad (2)$$

ここで，σ^2 は分散，μ は平均値，α，β は係数（パラメータ）である．式(2)の係数 α，β を回帰分析により求めておくことで，平均値を与えるだけで交通量の分散を導くことができるというものである．また，平均値と分散がわかっている場合，交通量の分布形を決定することができる．本研究では， K-S 検定において正規性が認められた観測地点と，認められなかった観測地点に分けて，それぞれ推定式(2)への適合度を決定係数 R^2 値を用い，時間交通量の平均値と分散の関係の算出結果の一部を**表 5**(平日)に示す．

表 5 平均値と分散の関係式への適用結果(平日)

時間帯	平日							
	正規性が認められた観測地点				正規性がなかった観測地点			
	地点数	α	β	R^2	地点数	α	β	R^2
0時	167	0.309	1.526	0.964	700	0.570	1.493	0.895
1時	164	0.367	1.505	0.940	703	0.541	1.550	0.925
2時	146	0.553	1.396	0.908	721	0.589	1.525	0.940
3時	180	0.620	1.379	0.866	687	0.767	1.441	0.925
4時	320	0.369	1.446	0.901	547	0.702	1.394	0.924
5時	365	0.310	1.436	0.960	502	0.628	1.395	0.905
6時	387	0.125	1.622	0.957	480	0.632	1.408	0.929
7時	194	0.135	1.599	0.929	673	0.715	1.372	0.905
8時	249	0.112	1.632	0.927	618	0.577	1.416	0.909
9時	267	0.114	1.627	0.943	600	0.754	1.374	0.907
10時	239	0.197	1.538	0.928	628	0.698	1.386	0.896
11時	242	0.271	1.480	0.914	625	0.761	1.378	0.902
12時	289	0.282	1.470	0.935	578	0.633	1.406	0.916
13時	317	0.241	1.468	0.936	550	0.759	1.355	0.908
14時	266	0.264	1.464	0.941	601	0.772	1.354	0.907
15時	249	0.224	1.513	0.925	618	0.783	1.365	0.909
16時	264	0.291	1.494	0.906	603	0.838	1.360	0.901
17時	277	0.178	1.563	0.890	590	1.087	1.323	0.893
18時	243	0.182	1.581	0.890	624	0.671	1.416	0.919
19時	208	0.142	1.630	0.968	659	0.387	1.548	0.939
20時	87	0.195	1.555	0.944	780	0.393	1.527	0.950
21時	156	0.096	1.669	0.979	711	0.353	1.544	0.949
22時	112	0.196	1.565	0.971	755	0.345	1.565	0.950
23時	92	0.154	1.652	0.968	775	0.474	1.496	0.955

(5) 統計諸量との関係性

2-(2) で算出された基礎統計諸量が時間や地点によって，どの程度変化が生じるのかを分析する．また，統計諸量間や統計諸量と交通量の分布形との関係性がどの程度存在するのかなど，統計分析により明らかにする．

3．最後に

本研究では，算出された統計諸量の関係性も考慮している．平均値，中央値，最頻値の間での大小関係と歪度の関係性やその他の研究内容に関しては，発表時に示す．

謝辞

本研究を進めるにあたり，貴重なデータを提供していただいた都市交通計画研究所の方々にこの場を借りて感謝の意を示します．

参考文献

1) 河村健二，中山晶一朗，高山純一：「新たな道路ネットワーク評価のための交通量変動分析」，平成 19 年度土木学会中部支部研究発表会講演集 pp291-292，2008

2) 飯田恭敬，高山純一：「交通量変動特性の統計分析」高速道路と自動車，第 24 巻第 12 号，1981

3) 稲田裕介，中山晶一朗，高山純一：「阪神高速道路の交通量の確率的特性に関する基礎的分析」，平成 20 年度土木学会中部支部研究発表会講演集 pp287-288，2009