積雪都市内道路における車頭時間分布特性 に関する統計的分析

Statistical Analysis of Characteristics of Time Headway Distribution on Roads in Snowy Cities

堀井 雅史*
Masafumi Horii

SYNOPSIS

In this paper, the author deals with time headway distribution on roads in snowy cities and make clear the characteristics of time headway distribution. Furthermore, several kinds of probabilistic distributions are applied to these data and χ^2 test is conducted. In conclusion, any probabilistic distributions are not adopted to these time headway distributions according to the χ^2 test. However, Pearson type III distribution and log-normal distribution are similar to these time headway distributions and these distributions can be applied to the INPUT distribution function of a network simulation model.

Keywords : time headway distribution, snowy city

1. はじめに

積雪都市では、冬季における道路交通を確保するため毎年多額の費用を投じて除排雪作業を実施している。このような現状を勘案すると、降・積雪による道路交通流に対する障害度合いおよびその影響要因を解明し、効率的除排雪計画を支援する道路交通シミュレーションモデルの作成が重要になってくる。しかしながら、積雪期における交通流に関する研究例は少なく、積雪期を対象とした道路交通シミュレーションモデルの入力値としてどのような分布を与えてやれば妥当であるかは不明確である。

そこで本研究は、積雪都市内の一般道路において調査を実施し、その資料を基に積雪期交通流特性、特に車頭時間分布に関する分析を行い、各種確率分布の適合性について検討を行ったものである。

2. 既往の研究例と本研究での分析方法

車の到着分布あるいは車頭時間分布に関する研究は古くから行われており、様々な確率分布の適用が試みられている^{1,2)}。これらによると、交通量が少ない状況ではランダム性が仮定でき、ポアソン分布あるいは負の指数分布が適合するが、交通量が増加するにつれて、拘束される車が増加し、アーラン分布、一般化されたガンマ分布の適合性が良くなることが指摘されている。また対数正規分布の当てはめを試みた研究もみられる^{3,4)}。最近では、自由流と拘束流の中間に位置する交通流に対して、自由流、拘束流それぞれに確率分布を当てはめ、それらを重ね合わせて車頭時間分布を提案している研究例がみられる^{5,6)}。これらの研究はそのほとんどが単路部を対象としたものである。

一方、交差点交通流に対する研究は飽和交通流率算定のための検討例が多く、車頭時間分布に関する

* 日本大学工学部土木工学科

[本稿受理：2001年3月12日，修正原稿受理：2002年5月15日，討論期限：2003年6月30日]

研究は少ないが、ガンマ分布を最小車頭時間だけシフトしたピアソンⅢ型分布の適合性が良いという報告がある⁷⁾。交差点交通流は信号制御によって中断されており、ランダム流とは考えにくい。したがって、どのような確率分布を与えれば良いか、特に積雪都市においてはいまだ不明確であるが、ネットワークシミュレーションモデルの入力分布としては、その理論的裏付け、取り扱い易さから指数分布、アーラン分布を用いている研究例が多い。

本研究でも積雪都市の道路交通流に以上の確率分布の適用を試みるが、無雪期と積雪期の両者について分析を行うことによって、それぞれの車頭時間分布にどのような特徴があるのかについて検討を行った。

調査対象都市は、会津若松市、米沢市、長岡市とし、各都市ごとに交差点を見渡せる場所にビデオカメラを設置して、オフピーク時、ピーク時に撮影を行った。これより車頭時間、気象状況などを読みとつ

た。なお、分析対象データは、停止線通過時の車頭時間とし、直進の乗用車間のみの車頭時間データを選択して用いた。調査は、会津若松市が1987年8月4～5日、1988年2月16～17日、米沢市が1988年8月3日、1989年2月22日、長岡市が1992年10月6日～7日に実施した。なお長岡市については、積雪期のデータが得られていないが、車頭時間分布特性の把握のために分析対象データに含めてある。

3. 分析結果

3.1 車頭時間分布特性

図-1から図-4に会津若松市および米沢市における無雪期、積雪期ごとの各調査時間帯別車頭時間の分布を示す。図-5には長岡市における無雪期の車頭時間分布を示した。なお図中の横軸の数字は各クラスの下限値を、縦軸は各クラスに該当する頻度を示す。また表-1に3都市の調査時間帯ごとの観

図-1 時間帯別車頭時間分布 (会津若松・無雪期)

図-2 時間帯別車頭時間分布 (会津若松・積雪期)

測した全データに関する各種統計量と測定時点での気象条件を示す。これらによると、どの時間帯においても2～3秒未満にピークを持つ左に偏った分布を示している。ギャップ（車頭間隔）数に関しては、会津若松市の場合、無雪期、積雪期とも11時～12時までが最も多く、それぞれ573、482となっている。ついで両者とも14時～15時と17時～18時がほぼ等しく、約490、440となっている。8時～9時は最もギャップ数が少なく、この地点の特徴である。車頭時間の平均値については、ギャップ数と逆の傾向がみられ、標準偏差についてもほぼ同様な傾向がみられた。無雪期と積雪期を比較すると、積雪期にはギャップ数が減少し、平均車頭時間および最小車頭時間が増大していることから降・積雪が交通流に影響を及ぼしていることがわかる。

図－3 時間帯別車頭時間分布（米沢・無雪期）

図－4 時間帯別車頭時間分布（米沢・積雪期）

米沢市と長岡市の場合、無雪期と積雪期、時間帯別にすべてのデータが収集されていないので、時間帯別あるいは時間帯別の特徴は明らかではないが、会津若松市と比較して、総ギャップ数は多くなっている。

図－5 時間帯別車頭時間分布（長岡・無雪期）

表－1 車頭時間の統計量と気象条件

			ギャップ数	平均車頭時間	標準偏差	最小車頭時間	天候	路面状態
会津若松	無雪期	8:00～9:00	444	5.25	6.15	0.72	晴	乾燥
		11:00～12:00	573	3.51	2.08	0.88	晴	乾燥
		14:00～15:00	496	3.93	2.66	0.89	曇	乾燥
		17:00～18:00	491	3.83	2.59	1.23	曇	乾燥
	積雪期	8:45～9:45	341	5.54	5.67	1.23	晴	アイスバーン
		11:00～12:00	482	4.10	2.93	1.18	晴	湿潤
		14:00～15:00	440	4.46	2.98	1.05	雪	湿潤
米沢	積雪期	17:00～18:00	441	4.11	2.72	1.08	雪	湿潤
	無雪期	15:50～16:50	596	3.11	2.48	0.75	晴	乾燥
	積雪期	17:00～18:00	680	2.85	1.78	1.00	雪	湿潤
長岡	無雪期	10:13～11:13	482	3.27	2.76	0.70	晴	乾燥
		15:00～16:00	526	3.51	3.42	0.80	晴	乾燥
		16:00～17:00	493	4.19	4.49	0.83	晴	乾燥
		17:00～18:00	673	3.29	3.04	0.74	晴	乾燥

3.2 車頭時間分布への確率分布の適用

ここでは、実測した車頭時間分布に対して今までに提案されている各種の確率分布の適用を試みた。確率分布としてはいくつか考えられるが、あらかじめ分析を試みた結果、最終的に①負の指数分布、最小車頭時間だけシフトした②修正指数分布、③ガンマ分布、ガンマ分布のパラメータ κ が正の整数をとる④アーラン分布、ガンマ分布を最小車頭時間だけシフトさせた⑤ピアソンⅢ型分布、⑥対数正規分布の6種類とした。以下にそれぞれの確率、あるいは確率密度関数を示す。

① 負の指数分布

$$P(t \geq h) = e^{-\lambda t} \quad (0 \leq t < \infty) \quad (1)$$

② 修正指数分布

$$P(t \geq h) = e^{-\lambda(t-\alpha)} \quad (\alpha \leq t < \infty) \quad (2)$$

③ アーラン分布

$$f(t) = \frac{\lambda}{(\kappa-1)!} (\lambda t)^{\kappa-1} e^{-\lambda t} \quad (0 \leq t < \infty) \quad (3)$$

④ ガンマ分布

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\kappa)} (\lambda t)^{\kappa-1} e^{-\lambda t} \quad (0 \leq t < \infty) \quad (4)$$

⑤ ピアソンⅢ型分布

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\kappa)} [\lambda(t-\alpha)]^{\kappa-1} e^{-\lambda(t-\alpha)} \quad (\alpha \leq t < \infty) \quad (5)$$

⑥ 対数正規分布

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (0 < t < \infty) \quad (6)$$

ただし、 α 、 λ 、 κ 、 ζ はパラメータである。なおパラメータ α は、当初積率法によって算出したが、最小車頭時間と解釈すると大きくなりすぎたため、 α には、過去の研究例⁸⁾と今回の測定結果⁹⁾より無雪期は0.7秒、積雪期は1.0秒としてパラメータ推定を行った。また適合度検定は χ^2 検定によって行った。

まず全データに対して上記の確率分布を当てはめ、 χ^2 検定を行ったところ、かなり大きな値が得られた。これはすべてのデータを用いてパラメータ推定を行ったため、ばらつきがそのまま反映されて、実際の分布とかけ離れた結果となったことによる。一般に、交通流問題において、車頭時間の短い範囲で

の分布が重要であり、大きな値を持つ車頭時間はさほど問題にならない場合が多い。そこで長時間の車頭時間は削除して、短時間の車頭時間についてのみ、確率分布の当てはめを試みた。具体的には車頭時間10秒未満の直進乗用車間の車頭時間のみのデータによってパラメータ推定を行った。なお、対象とした車頭時間データは、交差点交通流のため飽和交通流とそれに上流からの到着流が混在していることになる。本来であれば別個に検討すべきではあるが、既往の研究例^{5, 6)}にもみられるように、単路部での交通流が、後続車が低速車に追いつき車群を形成している部分と自由流の部分との重ね合わせと考えると、同様に取り扱える可能性があること、また短時間の車頭時間に限定しているため、その影響は少ないと考えられることより、ここでは併せて検討している。

表-2に会津若松市における対象となったデータ数、その結果をまとめて示す。まず、無雪期と積雪における車頭時間平均値の差の検定を行ったところ、積雪期11時のデータを除き、有意水準1%で差があるという結果を得た。したがって、路面状態、天候など気象条件の悪化により車頭時間分布の平均値は異なると考えて良い。また、等分散性の検定については、いろいろな結果が得られ、全体的な傾向は認められない。つぎに適合度検定については、自由度7, 8, 9, 10, 11, 12の1%有意水準の値 $\chi^2_7(0.01)$ 、 $\chi^2_8(0.01)$ 、 $\chi^2_9(0.01)$ 、 $\chi^2_{10}(0.01)$ 、 $\chi^2_{11}(0.01)$ 、 $\chi^2_{12}(0.01)$ 、はそれぞれ18.5、20.1、21.7、23.2、24.7、26.2であるから、今回実測した車頭時間分布は、統計的にはどの確率分布も当てはまらないことになる。特に指数分布、修正指数分布の χ^2 値はかなり大きく、交通流はランダム流ではないといえる。アーラン分布、ガンマ分布の適合度もあまり高くない。しかしながら、ピアソンⅢ型分布と対数正規分布の適合度は χ^2 値をみるとかなり高いことがわかる。実際、積雪期の8時45分～9時45分のデータに対数正規分布、ピアソンⅢ型分布を当てはめた場合の χ^2 値はそれぞれ21.7、23.6であり、1%有意の水準の χ^2 にかなり近いことがわかる。図-6にその分布図を示す。無雪期と積雪期とを比較すると、全体的に積雪期の方が確率分布の当てはまりが良い。

表－２ 会津若松市における確率分布の適合度検定 (χ^2 値)

確率分布名	無 雪 期				積 雪 期			
	8:00 ～	11:00 ～	14:00 ～	17:00 ～	8:45 ～	11:00 ～	14:00 ～	17:00 ～
指 数 分 布	168.3 (11)	349.9 (10)	294.8 (12)	302.4 (11)	172.0 (9)	210.6 (10)	287.4 (10)	394.3 (10)
修正指数分布	93.4 (10)	215.2 (9)	185.0 (12)	194.5 (10)	93.6 (9)	105.2 (10)	159.8 (9)	234.2 (9)
アーラン分布	59.9 (9)	67.3 (8)	72.9 (10)	72.8 (10)	38.1 (7)	53.6 (9)	69.4 (9)	47.7 (8)
ガンマ分布	50.9 (10)	63.6 (8)	62.4 (11)	53.8 (10)	32.4 (8)	41.7 (9)	60.8 (10)	41.9 (8)
ピアソンⅢ型分布	37.1 (9)	45.3 (7)	44.3 (10)	37.5 (9)	23.6 (7)	24.2 (8)	33.9 (8)	28.5 (7)
対数正規分布	32.2 (9)	31.6 (8)	34.3 (11)	27.6 (10)	21.7 (8)	23.7 (9)	29.2 (9)	23.6 (9)
ギャップ数	247	307	322	284	177	269	279	283
平 均 値	3.17	3.03	3.39	3.44	3.74	3.48	3.76	3.67
標 準 偏 差	1.91	1.48	1.73	1.62	1.79	1.82	1.77	1.46

※かつこ内の値は自由度を示す。

図－６ 車頭時間分布への確率分布の当てはめ
会津若松（1989年２月17日08:45～09:45）

図－７ 車頭時間分布への確率分布の当てはめ
米沢（1989年２月22日17:00～18:00）

表－３ 米沢市、長岡市における確率分布の適合度検定

確率分布名	米 沢 市				長 岡 市							
	無 雪 期		積 雪 期		無 雪 期							
	15:50 ～		17:00 ～		10:13 ～		15:00 ～		16:00 ～		17:00 ～	
	χ^2 値	自由度	χ^2 値	自由度	χ^2 値	自由度	χ^2 値	自由度	χ^2 値	自由度	χ^2 値	自由度
指 数 分 布	456.6	12	687.5	11	264.4	14	373.1	12	374.3	14	708.1	12
修正指数分布	255.1	11	313.7	10	85.2	12	157.8	11	151.6	11	321.9	11
アーラン分布	137.5	11	189.2	9	109.7	10	124.1	10	126.2	11	193.5	9
ガンマ分布	119.7	11	166.7	10	88.0	11	121.0	10	131.4	11	183.2	9
ピアソンⅢ型分布	84.1	10	93.4	9	32.6	10	83.3	10	75.7	10	120.2	9
対数正規分布	75.1	11	102.3	10	36.6	11	59.2	10	64.3	11	102.1	10
ギャップ数	458		558		431		458		417		615	
平 均 値	2.79		2.74		2.73		2.81		2.97		2.79	
標 準 偏 差	1.56		1.41		1.73		1.67		1.72		1.46	

表－３には米沢市、長岡市のデータに各確率分布を当てはめた場合の結果を示す。この場合、どの確率分布も統計的に有意ではないが、他と比較して、ピアソンⅢ型分布と対数正規分布の当てはまりは比較的良い。ただし、ギャップ数が増加するにつれて χ^2 値が大きくなっている。図－７は米沢市の積雪

期のデータにピアソンⅢ型分布と対数正規分布を当てはめた結果である。この場合はギャップ数が多いため、1.5～2.5秒での実測値と理論値の乖離が大きいため、これらの確率分布は交通量が増加するにつれて適合度が低下するようである。

3.3 交通流状態と適合度

3 都市の各確率分布への適合度をみると、どの車頭時間分布も統計的に有意でないことがわかった。交通工学では χ^2 検定によって採択された車頭時間分布のみが意味を持つが、本研究で用いた都市内道路交通流は、様々な要因が影響を及ぼすため、統計的に有意な分布を得ることはきわめて困難である。しかしながら、時間帯によっては統計的に有意ではなくとも χ^2 値が比較的小さな分布もあり、これらの分布と交通条件との関係を検討することは、実用上意義のあることであると考え、交通流状態と適合度の関係についての以下のような検討を行った。まず、比較的適合度の高いピアソンⅢ型分布と対数正規分布にしぼり、交通量レベルごとにどのような傾向を示すかについて検討を行った。

図-8 は 3 都市の各時間帯ごとの χ^2 値とギャップ数との関係をプロットしたものである。これによるとギャップ数が増加するにつれて χ^2 値は増加している。したがって、交通量が増加すると適合度は低下する傾向にある。

つぎに、以上の 3 都市内の道路は道路・交通条件が異なるため、同じ交通量レベルでの比較はできない。そこで各地点での交通容量を道路構造令¹⁰⁾に基づいて算出し、混雑度と χ^2 値との関係について検討を行った。ただし、これによると積雪期の路面状態の影響が考慮されない。路面状態が交通容量に及ぼす影響についてはいまだ確立されていないので、ここでは過去の研究例^{11,12)}を参考に各路面状態ごとの補正係数をかけて積雪期の交通容量を算出した。

図-9 は、ピアソンⅢ型分布を期間別に各時間帯のデータに当てはめた場合の関係を示す。図-10 は対数正規分布を当てはめた場合の同様の結果を示す。なお、参考のため図中に多項式回帰曲線を挿入してある。これらによるとまず期間別では積雪期の方が適合度が高い。さらに、無雪期では混雑度が増加するにつれて χ^2 値は減少し、ある点において最小となり、さらに混雑度が増加すると χ^2 値は増加しているように見える。適用例があまり多くないので断言はできないが、交通流がランダム、あるいは混雑時においてはこれらの確率分布の適合度は高くない

図-8 ギャップ数と χ^2 値の関係

図-9 混雑度と χ^2 値の関係

図-10 混雑度と χ^2 値の関係

が、混雑度が0.5を越えたある中間の領域においてはピアソンⅢ型分布、対数正規分布の当てはまりが良くなると考えられる。

積雪期においては明確な傾向は把握できないが、全体的に無雪期の場合より下にシフトしており、混雑度0.5付近に最小となる領域が存在しそうである。

4. まとめ

本研究は、積雪都市内道路における車頭時間分布に各種確率分布の当てはめを試みたものである。得られた成果を以下に示す。

1) 今回調査した 3 都市の交通流はランダム流ではなく、最小車頭時間だけシフトしたピアソンⅢ型分布、あるいは対数正規分布の適合度が高いことを示した。

2) 無雪期と積雪期を比較すると、積雪期において、ピアソンⅢ型分布、対数正規分布の実測車頭時間分布に対する適合度が高いことが明らかとなった。したがって、気象条件の悪化が交通流をある程度拘束し、これらの理論分布に適合しやすくしていることが考えられる。

3) 交通流状態と適合度の関係について検討を行った結果、混雑度の増加に伴い、ピアソンⅢ型分布、対数正規分布の適合度は高くなるが、さらに混雑度が増加するとこれらの適合度は低下しており、別の確率分布の適用が必要となる。

4) 対数正規分布に沿った乱数の発生は可能であり、シミュレーションモデルの入力関数として適用可能であると考えられる。したがって入力する交通流の混雑レベルに応じて、対数正規分布を用いたシミュレーションモデルを作成することにより、冬季における道路交通流特性を考慮したシミュレーションが可能となる。

今回、積雪都市における交通流シミュレーションモデルの入力車頭時間分布としてどのような関数を与えるべきかについて検討を行ったが、いくつかの課題が残っている。すなわち、飽和交通流と到着交通流との分離、定常性の検討、交差点間隔などであるが、いずれも地方都市のしかも積雪期の都市内交通流を対象としているため、それぞれの特性を個別に評価するためには、多くの時間を費やして測定しなければならない、実施困難であると考え。このため、本研究では詳細な検討を行わなかったが、今後、これらに関するより詳細な調査が実施されれば、さらなる検討を実施することにより、冬季交通流の解明に寄与できるものと考え。

また、今回分析に用いたデータは、9～14年前に調査したものであり、スパイクタイヤの禁止など道路に関する状況は現在と異なることが考えられる。しかしながら、スパイクタイヤが禁止されたことにより、薬剤散布量が増加しているとはいえ、現在の走行環境は悪化しているのが現状である。したがって、冬季交通流特性の解明は、積雪都市において依然として重要な課題であるが、これに対する研究例はあまり見あたらないため、本研究による冬季交通

流に対しての情報提供は可能であると考え。いずれにせよ、現況のデータで再検討する必要がある。

最後に本研究の実施にあたり、調査にご協力いただいた関係機関の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Adolf D. May : Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, 1990.
- 2) 加藤 晃・山根孟訳：計画者と技術者のための交通工学（下）、鹿島出版会、1976.
- 3) A. Daou : On Flow within Platoons, Australian Road Research, Vol.2, No.7, pp.4～13, 1966.
- 4) I. Greenberg : The Log-normal Distribution of Highway, Australian Road Research, Vol.2, No.2, pp.14～18, 1966.
- 5) 田村洋一・樗木 武：自由流・追従車構成に着目した車頭時間分布モデルに関する研究，土木学会論文集，No.336, pp.159～168, 1983.
- 6) 佐川大介・大蔵 泉・中村文彦：車頭時間分布のパラメータ推定に関する研究，交通工学，Vol.34, No.6, pp.18～27, 1999.
- 7) 斉藤 威：信号交差点における交通容量分布の定式化，及び，分布特性によるサービス水準への影響，科学警察研究所報告交通編，Vol.22, No.1, 1981.
- 8) 小野 学：街路における車頭時間分布について，第34回土木学会年次学術講演会概要集，pp.134～135, 1961.
- 9) 堀井雅史・村井貞規：積雪都市における道路交通流特性に関する一考察，第12回日本雪工学会大会論文報告集，pp.213～216, 1996.
- 10) 日本道路協会：道路の交通容量，1984.
- 11) 外井哲志・河野辰男・柴田正雄：信号交差点の交通容量に関する研究，交通工学，Vol.24, No.2, pp.7～18, 1989.
- 12) 石井憲一・斎藤和夫：冬期積雪時における信号交差点の交通容量解析，土木計画学研究・論文集，No.1, pp.123～130, 1984.