

バスの運行挙動に関する二、三の考察

BASIC STUDY ON CHARACTERISTICS OF BUS BEHAVIOR IN URBAN AREA

高岸節夫*・戸松稔**

By Setsuo Takagishi and Minoru Tomatsu

1. はじめに

街路の交通事情の悪化は、市民の足としての都市バスにも重大な悪影響をもたらした。今日問題化している公営交通事業の経営悪化の一つの大きな原因をそこにみることができる。最近、特に顕著になっている都市バスの輸送効率の低下に対応して、いくつかの対策が考えられるようになってきているが、他の交通機関を含めた総合的対策が必要であることはいうまでもない。

ところで、利用者が望ましいとするバスの運行状態には、運行時刻表(ダイヤ)どおりにバスが到着するとか、あるいは一定時分待たば必ずバスに乗れるというような、安定性および信頼性の保たれた運行状態が一つの大きな要素となっていると考えられる。現在のバスの運行状態では、これらの必要条件を満足させることは、ますます困難になりつつあり、これに対し種々の対策が提案されているのであるが、基本的にはバスの運行挙動に関する十分な把握を行なうことから始める必要がある。

バスの運行挙動に関する研究は、これまでわずかに遅延という形で取扱った研究¹⁾がみられる程度である。本研究は、安定性、信頼性のあるバス輸送方式を検討するための基礎的考察をめざしたものであって、まずバスの運行挙動の実態調査およびその解析を行ない、ついでバス運行の乱れについての伝播機構および発生要因に関する理論的考察を行ない、さらに乱れに関係するいくつかの基本的要因についてシミュレーションによりその乱れに対する影響の大きさを比較検討して、バス運行挙動の把握を試みたものである。

2. バスの運行挙動の実態調査およびその解析

これまで京都市営バスについて、昭和 43 年から同 45

年にかけて合計 3 回の調査を実施した。その一覧は表-1 に示すとおりである。また、調査はいずれも連続する各バスに 3 名の調査員が同乗することにより、出発、停止などの時刻をそのたびごとに記録し、停留所での乗降客数をも記録する方法により行なった。表-2 はその調査用紙の一部分である。

表-1 バスの運行挙動調査一覧

年月日	昭和43年10月25日	昭和43年12月5日	昭和45年12月8日
時間帯	14時~17時	7時30分~12時	7時30分~12時
対象バス	京都市営③系統	京都市営⑤系統	京都市営③系統
バスのタイプ	乗降口 料金支払 期の時期 乗務員数	非 降 車 時 2人	分 離 乗 車 時 1人
調査台数	6	14	12
主な調査項目	○バス停到着、出発時刻 ○バス停乗降客数 ○信号待ち時間 など		左の項目に加えて利用者のバス停到着分布(特定バス停のみ)

表-2 バス運行実態調査用紙

バス運行実態調査											
() → ()											
調査年月日			調査者氏名前部()								
天候()			後部()								
B.S.		到着時刻	出発時刻	降車人数	乗車人数	通過人数	積み残	流入待時間	信号待時間	右折待時間	前後ドア開閉時刻
No.	名称										
1	仕伏町										
2	上池田町										
3	別当町										
~~~~~											
26	四条中学										
27	梅津車庫										

さて、あるバスが始発点から終着点まで運行したときの総所要時間を、客の乗降のため停留所で停止していた時間(以下、サービス時間とよぶことにする)と、それ以外のバス停間所要時間(走行していた時間および信号待ちなどで停止していた時間を含む時間で以下、走行時間とよぶことにする)の2つに分けて考える。上記3調査結果によれば、サービス時間の総所要時間に占める割

* 正会員 工修 大阪府立高等専門学校講師

** 正会員 京都大学助手 工学部交通土木工学科

表-3 サービス時間の総所要時間に占める割合  
(時間帯 A.M. 7:30~8:00)

バス番号		1	2	3	4	5	6
総所要時間(秒)	A	2394	2300	2491	2412	2698	2398
サービス時間(秒)	B	456	529	542	451	729	409
サービス時間 総所要時間	B/A	0.190	0.230	0.218	0.187	0.270	0.171
総乗(降)車人数(人)		162	139	134	85	183	80

(注) 京都市営③系統バス, 昭和45年12月8日調査より

合は約15~30%であるが、連続する6台のバスに対する調査結果を示した表-3をみてもわかるように、この割合は同一系統の同一時間帯についてすら、バスごとに異なっていて、運行乱れのあることを示唆している。

ところで、一般に運行の乱れという場合、定められた運行ダイヤからのずれによって取扱うのが普通である。バスの場合にもこの方法で取扱うこともできるが、バスのダイヤは鉄道などに比して正確性に欠けること、また運行頻度の高い路線ではむしろバス間の時間間隔が問題となることから、ここではバスの運行の乱れを運行時間間隔の乱れで取扱うことにする。なお、ここでいう運行時間間隔とは、相前後して運行する2台のバス間の時間差を任意地点でとらえたものをさすが、これをバス停到着時でとらえるときは到着時間間隔、出発時でとらえるときは出発時間間隔とよぶことにする。

さて、図-1はバスの時間間隔の乱れを視覚的に把握できるように、バスの運行軌跡を縦軸に距離、横軸に時間をとって図示したもの一つである。また表-4は同図の6台のバスの出発時間間隔を計算し、これを整理したものである。これらの図、表から、運行時間間隔の乱れの現況を概観することができるのであるが、こうした乱れが生ずる理由を以下に考察してみる。

まず特定の時間間隔の変化に着目するとき、時間間隔が拡大されたり、縮小されたりする傾向がみられる。これは図-1において始発点より6~8番目のバス停までの時間間隔の変化において特に顕著であり、時間間隔の

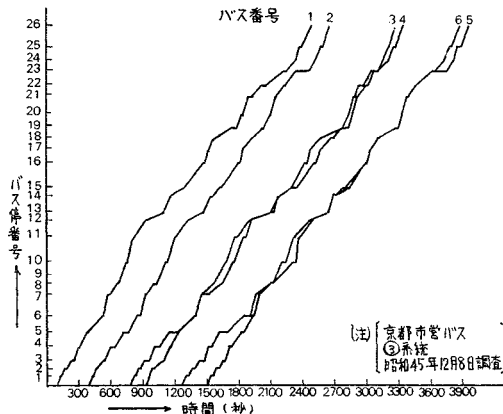


図-1 バスの運行軌跡

表-4 出発時間間隔とその標準偏差 (単位: 秒)

バス停 番号	時間間隔					平均	標準偏差	最大差
	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6			
1	298	389	151	331	243	284.2	83.4	238
2	297	398	127	373	227	284.4	99.0	271
3	286	411	120	389	224	286.0	107.4	291
4	294	423	133	377	203	286.0	107.2	290
5	335	418	100	389	185	285.4	122.7	318
6	368	462	40	433	153	291.2	165.8	422
7	342	521	12	501	36	282.4	220.0	509
8	346	523	44	463	32	281.6	206.9	491
9	358	552	65	478	12	293.0	217.5	540
10	365	545	62	481	28	296.2	213.3	517
11	371	571	62	481	98	316.6	203.6	509
12	388	583	71	464	52	311.6	213.5	531
13	400	577	37	551	18	316.6	247.7	559
14	374	635	30	503	17	311.8	249.5	618
15	377	622	6	515	13	306.6	254.7	616
16	347	664	38	452	48	309.8	240.6	626
17	323	631	80	487	3	304.8	237.3	628
18	321	630	101	471	5	305.6	230.2	625
19	340	646	109	440	※17	310.4	226.7	629
20	256	749	134	453	12	320.8	259.0	737
21	274	731	34	464	3	301.2	272.9	728
22	238	733	27	469	13	296.0	274.5	720
23	186	739	47	437	24	286.6	269.7	715
24	216	637	4	648	※114	323.8	268.7	633
25	177	642	49	608	※91	313.4	258.0	593
26	196	618	66	609	※97	317.2	245.7	552
全 体						300.9	219.0	

(注) ※印はバスの前後が入替ったことを意味する。

相対的に小さいものは、距離が増すごとにその時間間隔がますます縮小されてゆく傾向にあり、逆に相対的に大きいものは拡大されてゆく傾向にある。3番目と4番目のバス、5番目と6番目のバスのいわゆるだんご運転(時間間隔が0に近い値で運行する状態)が終着点まで続く理由も、この傾向があると認めることで説明される。また、この時間間隔の大小が交互に現われていることも図からわかる。このような現象は経験的にも明らかなように、大きい時間間隔を保って走行するバスには、相対的に多数の乗降客があり、逆に小さい時間間隔で走行するバスには、相対的に少数の乗降客しかないとことに起因している。実際、図-1において、前車との間に比較的大きな時間間隔を保って走行した3番目のバスの総乗車客数(総降車客数に等しい)が134人であるのに対し、比較的小さい時間間隔で走行した4番目のバスのそれは85人にすぎなかった。また、サービス時間の総所要時間に占める割合も、3番目のバスが0.218であるのに対し、4番目のバスは0.187であった。これから、時間間隔の拡大あるいは縮小をもたらす原因の1つは、乗降客数に比例的であるサービス時間の長短であると考えられる。この傾向は、ワンマンバスにかぎらず、2人乗務のタイプのバスにもあてはまることであったが、バス停への乗客の到着がバスの時間間隔に比例す

るような場合には、バスのタイプによらずあてはまるものである。

一方、この傾向だけでは時間間隔の乱れを説明したとはいえない。すなわち、時間間隔が相対的に大きくも小さくもなく、拡大も縮小も起こらない状態の存在が考えられ、相対的に大きい、あるいは小さい時間間隔をもたらす原因を他に求めておかねばならないのである。この調査では、出発する時点ですでに時間間隔は乱れていたが、その他に各地点におけるサービス時間と走行時間もバスによって異なっている。すなわち、前車との時間間隔が大きい場合にも必ずしもサービス時間は長くなっておらず、またバス停間の走行軌跡の直線勾配から読みとれるように、走行時間は同一の区間においてもバスによって異なっており、これらは時間間隔の乱れの発生としてとらえられると考えられる。

こうしてみると、現実の運行の乱れは、サービス時間と走行時間の変動による運行時間間隔の変動現象と、時間間隔の拡大・縮小現象とが複合したものであると考えられ、表-4 に示した時間間隔のバラツキはその一つの結果であるとみることが出来る。以下はこの両者についての解析を試みたものである。

### 3. 運行時間間隔の拡大・縮小現象

運行時間間隔の拡大・縮小現象はバス停におけるバスの乗降サービスに伴って生じ、以下のように数式を用いて説明することができる。

いまあるバス停におけるバスの運行時間間隔を  $x$  で、サービス時間を  $S$  で表わし、 $S$  と  $x$  の間に次の関係があるものとする。

$$S = S(x) \dots \dots \dots (1)$$

あるバス停の付近におけるバスの運行軌跡を図-2 で示すとき、 $j$  番目のバスの  $i$  バス停におけるサービス時間  $S_{ij}$  は、式 (1) から

$$S_{ij} = S(x_{i+1,j}) \dots \dots \dots (2)$$

と表わされる (サービス中に新たに到着する乗客もあるので、 $x$  として出発時間間隔  $x_{i+1,j}$  を用いる)。図-2 で示す関係により

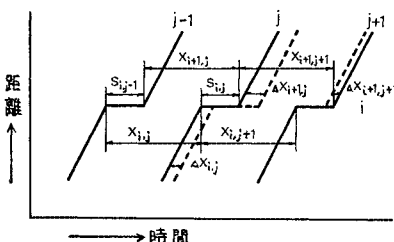


図-2 バスの運行軌跡説明図

$$x_{i+1,j} = x_{i,j} + S(x_{i+1,j}) - S_{i,j-1} \dots \dots \dots (3)$$

上式の両辺を  $x_{ij}$  で微分し、 $dS_{i,j-1}/dx_{ij} = 0$  を考慮して整理すると

$$\frac{dx_{i+1,j}}{dx_{ij}} = \frac{1}{1 - \frac{dS(x_{i+1,j})}{dx_{i+1,j}}} \dots \dots \dots (4)$$

が得られる。ここで  $S$  を増加関数であると仮定すれば、すなわち時間間隔  $x$  が増加するときサービス時間  $S$  も増加すると仮定すれば

$$\frac{dS(x)}{dx} > 0 \dots \dots \dots (5)$$

である。通常の状態においては、この値は 1 よりも小さいから式 (4) は次のような値をとる。

$$\frac{dx_{i+1,j}}{dx_{ij}} > 1 \dots \dots \dots (6)$$

これは到着時間間隔の微小変化量  $\Delta x_{ij}$  が、バス停出発時には  $1/\{1 - dS(x_{i+1,j})/dx_{i+1,j}\}$  倍に拡大され、 $\Delta x_{i+1,j}$  になることを意味している (図-2 参照)。このように先に述べた時間間隔がバス停を通過してゆくごとに拡大あるいは縮小されてゆく原理が説明されるが、式 (4) によって説明されるこの作用を、乱れの拡大作用とよぶことにする。

ところで、バスの時間間隔は相互に関連したものであり、あるバスが遅れて前車との間隔が大きくなったということは、後続するバスとの間隔が縮まったということでもある。図-2 でいえば、 $x_{ij}$  の変化は  $x_{i,j+1}$  の変化である。したがって  $x_{ij}$  の変化に伴って  $x_{i+1,j}$  が変化したと同様に、 $x_{i+1,j+1}$  も変化するから、次に、この場合の関係について考察を加えてみる。 $x_{i+1,j+1}$  と  $x_{i,j+1}$  の関係は式 (3) と同様に

$$x_{i+1,j+1} = x_{i,j+1} + S(x_{i+1,j+1}) - S(x_{i+1,j}) \dots (7)$$

であり、この両辺を  $x_{ij}$  で微分すると

$$\frac{dx_{i+1,j+1}}{dx_{ij}} = \frac{dx_{i,j+1}}{dx_{ij}} + \frac{dS(x_{i+1,j+1})}{dx_{i+1,j+1}} \cdot \frac{dx_{i+1,j+1}}{dx_{ij}} - \frac{dS(x_{i+1,j})}{dx_{i+1,j}} \cdot \frac{dx_{i+1,j}}{dx_{ij}} \dots \dots \dots (8)$$

ここで

$$\frac{dx_{i,j+1}}{dx_{ij}} = -1 \dots \dots \dots (9)$$

$$\frac{dx_{i+1,j}}{dx_{ij}} = \frac{1}{1 - \frac{dS(x_{i+1,j})}{dx_{i+1,j}}} \dots \dots \dots (10)$$

であることを考慮し、さらに

$$\frac{dS(x_{i+1,j+1})}{dx_{i+1,j+1}} = \frac{dS(x_{i+1,j})}{dx_{i+1,j}} = \frac{dS(x_{i+1})}{dx_{i+1}} \dots (11)$$

と仮定すれば式 (8) は

$$\frac{dx_{i+1,j+1}}{dx_{i,j}} = - \frac{1}{\left(1 - \frac{dS(x_{i+1})}{dx_{i+1}}\right)^2} \dots \dots \dots (12)$$

と整理される。上式は  $x_{i,j}$  が増加するとき  $x_{i+1,j+1}$  は

減少することを示しており、同図でいえば  $d x_{i+1, j}$  と  $d x_{i+1, j+1}$  の和が  $x_{i+1, j+1}$  の減少量としてこの式で計算されることになる。このうち変化量  $d x_{i+1, j+1}$  は、 $j$  番目のバスの運行乱れによって誘引された  $j+1$  番目のバスの乱れであり、このような作用を乱れの伝達作用とよぶことにする。

以上で述べた乱れの拡大、伝達作用は、日常バス停でよく経験する、長い時間待たされてようやく来たバスは2台連続して、前車は満員、後車はガラ空きだったというような事象に対応している。

このようなバスの時間間隔の変化に関する法則は、式(1)の  $S(x)$  の関数形に依存している。そこで、この関数形についていま少し考察し、式(4)の値がどの程度のものかを現実の調査データにより計算してみよう。

バスの運行時間間隔とサービス時間の関係は、乗降人数を介して、時間間隔と乗降人数の関係および乗降人数とサービス時間との関係に分けて考えられる。後者の乗降人数とサービス時間との関係は、バスの構造(乗降口が分離されているかどうか)、料金徴集形態(料金の支払いは乗車時か降車時かあるいは現金か乗車券か)、乗務員数(ワンマンかツーマンか)などが組み合わさったそのバス特有のタイプによって異なる。しかしこれを乗車人数と乗車サービス時間および降車人数と降車サービス時間の2つに分けて考えると、バスのタイプによらず、乗車サービス時間および降車サービス時間はそれぞれ乗車人数、降車人数の一次式で表わすことができる^{2),3)}。すなわち、乗(降)車人数が  $N$  人のときの乗(降)車サービス時間  $S$  は式(13)のように表わされる。

$$S = aN + b \quad (a, b \text{ は定数}) \dots\dots\dots (13)$$

係数  $a, b$  は前述の調査結果を用いて回帰分析を行なった結果、表-5のような値であり、その相関比は同表に示すごとく0.9前後であった。上記のバスの各タイプに対して、このような回帰式が得られたならば、これからサービス時間の全体を推定することができる。たとえば乗降口非分離のバスでは乗車サービス時間と降車サービス時間の和でサービス時間が与えられる。

次に、バスの運行時間間隔と乗降人数との関係について

表-5 乗(降)車サービス時間と乗(降)車人数の相関

バスのタイプ		分 類	回 帰 式		相 関 係 数	サ ン プ ル 数	適 用 範 囲
乗 降 口	料 金 の 支 払 期		乗 務 員 数	$S$ : サービス時間(秒) $N$ : 乗車人数(人) $V$ : 降車人数(人)			
非 分 離	降 車 時	2	乗車	$S = 0.9842 N + 6.116$	0.9383	71	$1 \leq N \leq 53$
			降車	$S = 1.343 V + 2.698$	0.8960	101	$1 \leq V \leq 29$
分 離	降 車 時	2	乗車	$S = 0.9406 N + 2.411$	0.8952	31	$1 \leq N \leq 19$
			降車	$S = 1.549 V + 1.985$	0.8706	35	$1 \leq V \leq 30$
分 離	乗 車 時	1	乗車	$S = 2.118 N + 3.595$	0.8440	70	$1 \leq N \leq 26$
			降車	$S = 1.105 V + 4.809$	0.8614	70	$1 \leq V \leq 23$

て述べる。一般に、あるバス停での降車人数はバスのその停留所に至るまでの履歴やその路線の乗客のOD構成などに関係して、そのバス停における時間間隔と直接関連させて取扱うことができない。そこで、ここでは乗車客はあるが降車客のない場合について考察をすすめることにする。乗車人数については、時間間隔との間に一般に比例の関係が認められる。その到着の状況はある確率分布に従うと考えられるが、ここでは一定間隔で到着するものとし、時間間隔と到着人数の間に完全な比例関係が成立するものと仮定する。このとき、 $i$  バス停において、単位時間あたりの乗客到着率を  $\lambda_i$ 、前車との出発時間間隔を  $x_{i+1}$  とすれば、この間に到着する乗客数  $N_i$  は

$$N_i = \lambda_i x_{i+1} \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる。したがってこのバス停でのサービス時間  $S_i$  は上式を式(13)に代入することによって

$$S_i = S(x_{i+1}) = a \lambda_i x_{i+1} + b \dots\dots\dots (15)$$

と表わされる。これから

$$\frac{dS_i}{dx_{i+1}} = a \lambda_i \dots\dots\dots (16)$$

が得られ、結局先に述べた乱れの拡大・伝達には1人あたり乗車所要時間  $a$  と、そのバス停の乗客到着率  $\lambda_i$  が寄与することがわかる。表-6は  $a=2.118$  秒/人(ワンマンバス1人あたり乗車所要時間、表-5参照)とし

表-6 バス停別乗客平均到着率と式(4)の計算値  
( $a=2.118$  秒/人)

バ ス 停 名		乗客平均到着率 $\lambda$ (人/秒)	$\frac{1}{1 - (dS/dx)}$
1	北白川仕伏町	0.04320	1.1007
2	上 池 田 町	0.02320	1.0516
3	北白川別当町	0.02937	1.0663
4	北白川小倉町	0.04545	1.1066
5	田中樋ノ口町	0.04350	1.1014
6	里 の 前 町	0.04945	1.1169
7	百 万 遍	0.01628	1.0357
8	加 茂 大 橋	0.02130	1.0472
9	河原町今出川	0.01092	1.0236
10	白 梅 団 子	0.00000	1.0000
11	府立病院前	0.00269	1.0057
12	河原町丸太町	0.00963	1.0208
13	河原町二条	0.00694	1.0149
14	河原町三条	0.00577	1.0124
15	四条河原町	0.00587	1.0126
16	新 京 極	0.01226	1.0267
17	四 条 烏 丸	0.00984	1.0212
18	四 条 西 洞 院	0.00328	1.0069
19	四 条 堀 川	0.00260	1.0055
20	四 条 大 宮	0.00244	1.0052
21	四 条 坊 城	0.00198	1.0042
22	四 条 中 新 道	0.00000	1.0000
23	四 条 御 前 通	0.00000	1.0000
24	西 大 路 四 条	0.04188	1.0973
25	西 院 薬 町	0.00067	1.0014
26	四 条 中 学 校 前	0.00000	1.0000
27	梅 津 車 庫 前	0.00203	1.0449

(注) 京都市営②系統バス 昭和45年12月8日調査より

て、先の通勤時間帯における京都市営系統3のバス路線についての調査データの平均乗客到着率を用いて、式(4)の値を計算したものである。最大値でも1.1169とそう大きな値とはいえないが、乱れの拡大作用はバス停を経過するごとに累加されてゆき、たとえば起点( $i=0$ )で生じた乱れは、 $i$ 番目のバス停を出発するときには、

$$\left(\frac{1}{1-a\lambda_1}\right)\left(\frac{1}{1-a\lambda_2}\right)\cdots\left(\frac{1}{1-a\lambda_i}\right) = \prod_{i=1}^i \left(\frac{1}{1-a\lambda_i}\right) \cdots \cdots (17)$$

倍に拡大されるはずだから、その影響は無視し得ないものとなる。なおこの式から、バスの出発初期における乱れが運行乱れの全体に大きな影響をおよぼすことが理解される。

#### 4. 乱れの発生

これまで述べたことによって、バスの運行挙動には乱れを拡大したり、後続するバスに伝えたりする機構が内在することを示した。バスの運行の乱れの原因として、そのほかに、サービス時間と走行時間がバスによって異なることにより生じるものがあげられる。これを原因とする乱れは、上記の、乱れがあってこれを拡大・伝達するという作用にくらべると、ランダムに生じるという点で乱れの発生としてとらえられ、次にこれらについて考察してみる。

##### (1) サービス時間の変動

各バス停での乗降人数は、たとえ一定間隔でバスが到着してもバスによって異なる。バスの到着時刻が明示されていず、その大体の時間間隔が表示されているような運転頻度の高い路線のバス停について、乗客の到着状況を調べてみると、次のようにポアソン分布で近似できることがわかる。図-3は3番系統のあるバス停について、1分間あたりの乗客の到着人数を連続調査した結果

表-7 ポアソン分布の適合度の検定結果

バス停名	平均値 $m$ (人/分)	$\chi^2$	自由度 $\phi$	$\chi^2$ ( $\phi, 0.05$ )	ポアソン分布の仮定	系統調査時間帯
上池田町	1.13	2.28	2	5.99	棄却できない	③7:30~8:30
小倉町	2.62	4.80	4	9.49	〃	③7:30~8:00
修学院道	1.978	4.30	5	11.07	〃	⑤7:00~8:00
一乗寺向畑	0.574	3.29	4	9.49	〃	⑤7:00~8:00
清水町	1.168	1.60	5	11.07	〃	⑤7:00~8:00
下り松	1.265	0.20	4	9.49	〃	⑤7:00~8:00
木の本町	0.708	0.58	4	9.49	〃	⑤7:00~8:00
上終町	0.833	2.68	4	9.49	〃	⑤7:00~8:00

(注) 系統③は昭和45年12月8日、⑤は昭和45年12月18日調査を示している。(a)の累積到着人数のグラフから、この調査時間帯については、乗客の平均到着率をほぼ一定とみなすことができる。(b)は同じく1分間あたりの到着人数の頻度分布を示したものであるが、カイ自乗検定によるポアソン分布の適合度は図中に示したような水準で有意であった。なお、3番および5番系統におけるいくつかのバス停に対する同検定の結果を表-7に示しておいた。このように乗客の到着がポアソン到着であると仮定できれば、 $i$ バス停において、前車との時間間隔  $x_{i+1}$  で出発するバスに  $k$ 人が乗車する確率  $P_k(x_{i+1})$ は、このバス停の乗客平均到着率を  $\lambda_i$ として、

$$P_k(x_{i+1}) = \frac{(\lambda_i x_{i+1})^k}{k!} \exp(-\lambda_i x_{i+1}) \cdots \cdots (18)$$

で与えられることになる。しかし、バスの運転本数が少なく、到着時刻が表示されているような路線のバス停では、乗客の到着状況も異なったものとなろう。

一方、降車客数の変動は、先に述べたようにそのバス停までの運行履歴、そのバス路線利用客のOD構成などがからんで生じている。たとえば、過去の  $l$ バス停で乗車した人数を  $N_l$ 、乗客のOD構成を  $\mu_{li}$ で与えると、 $i$ バス停の降車人数  $V_j$ は

$$V_j = \sum_{i=1}^i \mu_{li} N_l \quad (\sum_l \mu_{li} = 1) \cdots \cdots (19)$$

で与えられるが、 $V_j$ の変動を確率的に与えることはむずかしく、ここでは降車人数の変動もサービス時間の変動の一要因であるということにとどめる。

サービス時間の変動には、以上のほかに1人あたり乗降所要時間が人により異なることによって生じるものがある。この変動は正規分布と仮定できると思われるが、表-5の回帰分析からの推定では、これを原因とする変動量はサービス時間の変動量にとってあまり主要なものではない。一方、乗車人数の変動による乗車サービス時間の変動量は、次のような簡単な計算によって、その大体の大きさをうかがうことができる。すなわち、前車との出発時間間隔が  $x$ である場合、乗客の到着がポアソン分布に従うものと

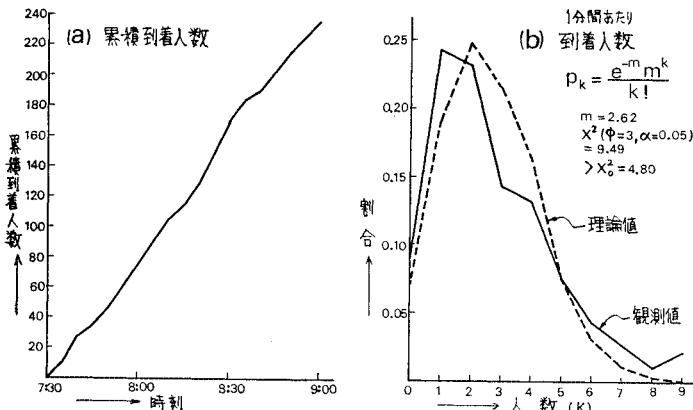


図-3 乗客の到着分布

仮定すると、乗車サービス時間の標準偏差  $\sigma_S$  は

$$\sigma_S = a\sigma$$

$$= a\sqrt{\lambda x} \dots \dots \dots (20)$$

で与えられる。ここに  $a$  は1人あたり乗車所要時間、 $\sigma$  はポアソン分布の標準偏差、 $\lambda$  は乗客の平均到着率である。たとえば、 $x=300$  秒の場合、 $a=2.118$  秒/人(表一5 参照)、 $\lambda=0.0495$  人/秒(表一6 のバス停中最大到着率)とすると、 $\sigma_S \doteq 8.2$  秒である。

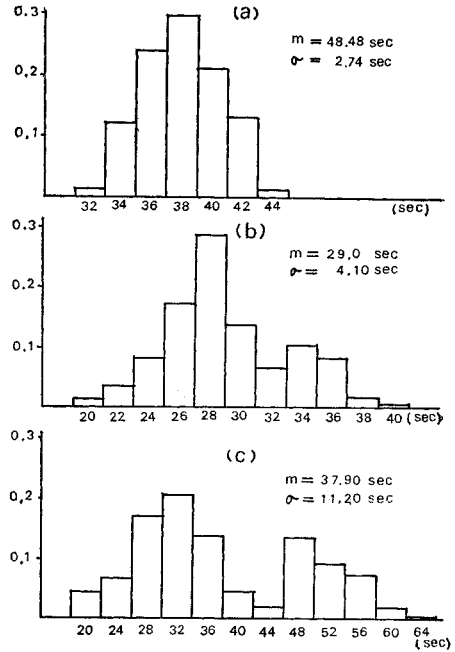
(2) 走行時間の変動

各バス停間の走行所要時間の変動は、サービス時間の場合と異なって、バスの時間間隔とは独立に取扱うことができる。例外として、運転手が遅れをとりもどそうとして恣意的にスピードアップするような場合も考えられるが、今日の交通事情の下ではこうしたことはほとんど無視できよう。走行時間の変動は、運転手の個人差と、そのバスが遭遇する交通状況の差異によって引き起こさ

表一8 区間平均走行所要時間およびその標準偏差

No.	バス停名称	区間平均走行所要時間(秒)	標準偏差(秒)
1	修学院	24.3	2.9
2	一乗寺向畑	23.6	4.4
3	一乗寺清水	29.6	4.2
4	一乗寺下り松	54.0	7.3
5	一乗寺木の下	48.6	2.1
6	上終町	51.0	2.3
7	北白川別当	60.8	19.8
8	北白川校	35.2	12.8
9	銀閣寺	66.6	22.7
10	浄土寺	44.9	10.4
11	鹿ヶ谷	47.6	3.2
12	真如堂前	44.0	3.2
13	東天王町	77.5	17.6
14	永観堂	57.0	2.6
15	法勝寺	56.4	12.9
16	動物園	43.4	3.6
17	京都会館	66.4	11.9
18	神宮道	96.4	20.1
19	東山三条	92.0	23.9
20	三条京阪	123.1	31.8
21	河原町三条	71.5	15.1
22	四条河原町	96.3	25.3
23	新京極	161.5	33.6
24	四条烏丸	72.7	26.8
25	烏丸松原	46.9	7.0
26	烏丸五条		

(注) 京都市営⑧系統バス、昭和43年12月5日調査より



図一4 区間走行時間の分布

れるものであろうが、後者の影響がきわめて大きいと考えられるからである。表一8 は郊外部より都心方向へ向かうバス路線(系統5)について、その区間走行所要時間の平均値と標準偏差を示している。標準偏差は都心部ほど大きな値を示しており、交通事情の影響の大きいことがうかがわれる。また、標準偏差の最大値は33秒であり、先のサービス時間の変動の標準偏差の数値と比べて、きわめて大きな値となっていることがわかる。

こうした走行時間の分布形は図一4に示したようにほぼ3つのパターンに分類される。同図の(a)は、交通量が少なく、交差点を含まないような区間についてであり、標準偏差は小さく、正規分布に近い形となっている。(b)は、やや交通量の多い区間であり、分布形には中央より右方への張り出しが認められ、これが平均値や偏差の増大をもたらしていることがうかがわれる。(c)は、信号交差点を含む区間であり、標準偏差は大きく、分布形は2つの山を持つ。したがって走行時間の変動を、何らかの理論分布で近似しようとする場合、(a)のようなパターンについては正規分布とみなせるが、(b)あるいは(c)については、アーラン分布等の他の分布形を検討すべきであり、特に(c)は複合分布とする必要があろう。

5. 乱れの要因とその寄与率

現状のバス運行の乱れは、これまで述べてきたような

各要因の複合現象としてあらわれる。各要因を部分的にみれば、ある程度の数式的表現も可能であるが、バスの運行の全体を解析的にとらえることはむずかしい。

ここでは、これまで述べてきた時間間隔と乗車人数との比例傾向、乗車人数のポアソン変動、区間走行時間の変動を適宜組み込んだシミュレーションモデルを組み立て、これからの結果を実験計画法⁷⁾によって解析して、乱れにおよぼす各要因の影響の大きさについて検討してみる。

シミュレーションモデルは、基本的にはワンマンバスの運行する京都市営3番系統の路線を対象とした。また前記の3つの要因を表-9に示すように2水準に分けたから、その組み合わせとして  $A_1B_1C_1$  から  $A_2B_2C_2$  までの8通りが考えられる。そのうち、水準の組合せとして  $A_1B_1C_1$  を持つシミュレーションは、現実のバス運行にもっとも近いシミュレーションであり、他は各要因の乱れに及ぼす影響の大きさをみるために設けた仮想的なバスの運行状態ということになる。モデル化における共通した仮定は次のとおりである。

- i 各バスは始発点を定間隔で出発する。
- ii 降車客数はそのバス停到着時に乗車中の人員に一定値を乗じたものとする。
- iii 乗車サービス時間、降車サービス時間はそれぞれ乗、降客数の一次式で表わされる。
- iv 各バス停のサービス時間は乗車サービス時と降車サービス時間のうちいずれか長い方とする。
- v バスの定員は80人とし、満員になれば乗車サー

表-9 因子レベル

要 因	水準	内 容
A：区間走行時間	$A_1$	平均値のまわりに正規分布
	$A_2$	各区間で一定値（平均値）
B：乗 客 数	$B_1$	平均乗客数のまわりにポアソン変動
	$B_2$	平均乗客数
C：平均乗客数の計算	$C_1$	時間間隔に比例する
	$C_2$	各バス停で一定値

バスは打切られ積残された乗客は後続するバスにまわされる。

なお、各バス停の乗客の到着率、走行時間の分布形態に必要な数値その他は、前記3番系統のバスに対する調査結果を用いた。またポアソン分布、正規分布は計算機内でそれぞれポアソン乱数、正規乱数を発生させて処理した。

これらのシミュレーション結果の一例を表-10に示した。表の数値は100台のバスに対する集計結果である。各指標は先に定義した時間間隔の乱れの大きさに対応しないものもあるが、一般に数値が大きいほど運行乱れが大きいといえる。当然のことながら、組合せ  $A_1B_1C_1$  で数値が最も大きくなる傾向にあり、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_2$  では乱れの発生要因が何もなく、すべてのバスは出発時の一定間隔(313.6秒)を保って走行し、1人あたり平均待時間のみが出発時間間隔の半分(156.8秒)として計算されている。また各数値の順位は、指標ごとに若干の違いがあるが、その原因はシミュレーション結果の不安定性に帰すよりは、各指標の計算式の相違に路線特性などが相まって生じたものであることがわかって

いる。次に1人あたり平均待時間の指標を例にとり、実験計画法により各要因の寄与率を計算してみよう。ここで1人あたり平均待時間  $\bar{x}$  とは、

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \sum_j N_{ij} x_{ij} / 2 + \sum_i \sum_j N_{ij}' (x_{ij} / 2 + x_{i,j+1})}{\sum_i \sum_j (N_{ij} + N_{ij}')} \dots (21)$$

で計算される。上式において  $i, j$  はそれぞれバス停番号、バス番号であり、 $x_{ij}$  は時間間隔、 $N_{ij}$  は積残された乗客を含まない乗車人数、 $N_{ij}'$  は積残されて  $j+1$  バスに乗った乗車人数である。したがって  $\bar{x}$  は積残があると増加する一方、乗車人数が時間間隔と比例関係にあれば、時間間隔が乱れるほど増大する性格を持っている。表-11は、以下の分析のためのデータであり、各回の数値は1回のシミュレーションで50台のバスを走

表-10 シミュレーション結果

指 標	乗客1人当り平均待時間 (秒)	待時間の分散 (秒 ² )	総所要時間の分散 (秒 ² )	運行時間間隔の分散 (秒 ² )	利用車人数の分散 (人 ² )
組合せ					
$A_1B_1C_1$	169.8	2733.5	8592.6	9339.9	257.8
$A_1B_1C_2$	161.8	1815.7	4934.1	5262.3	95.7
$A_1B_2C_1$	162.6	974.9	9255.1	9763.4	164.4
$A_1B_2C_2$	156.9	439.0	5685.3	4702.2	0.0
$A_2B_1C_1$	165.0	2274.4	1457.5	1728.7	191.0
$A_2B_1C_2$	159.4	657.1	731.9	765.7	98.2
$A_2B_2C_1$	156.8	0.0	0.0	0.0	0.0
$A_2B_2C_2$	156.8	0.0	0.0	0.0	0.0
サンプル数	100×20	100×20	100	100×20	100
計算式の概略	$\frac{1}{2} \frac{\sum \sum N_{ij} x_{ij}}{\sum \sum N_{ij}}$	$\frac{1}{2} \frac{\sum \sum N_{ij} (x_{ij} - \bar{x})^2}{\sum \sum N_{ij}}$	$\frac{\sum_j (T_j - \bar{T})^2}{\sum T_j}$	$\frac{\sum \sum (x_{ij} - \bar{x})^2}{\sum \sum N_{ij}}$	$\frac{\sum (N_j - \bar{N})^2}{\sum N_j}$

$N$ : 乗車人数,  $x$ : 時間間隔,  $T$ : 走行所要時間,  $i$ : バス停番号,  $j$ : バス番号

表-11 シミュレーション結果(乗客1人あたり平均待時間)

(単位:秒)

回	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
組合せ										
A ₁ B ₁ C ₁	165.7	166.4	181.3	169.2	174.6	168.7	163.4	174.6	168.7	167.7
A ₁ B ₁ C ₂	158.6	164.0	159.2	163.9	157.5	157.9	164.3	160.0	167.1	165.3
A ₁ B ₂ C ₁	161.4	161.2	164.3	161.9	167.9	160.4	164.0	162.5	158.5	163.6
A ₁ B ₂ C ₂	158.3	155.8	157.1	158.8	156.5	157.9	157.8	154.3	156.8	155.1
A ₂ B ₁ C ₁	168.3	170.5	161.0	162.8	160.6	169.6	160.5	159.3	165.8	171.7
A ₂ B ₁ C ₂	158.6	161.9	157.2	159.8	160.2	162.5	159.1	158.4	158.8	157.8

表-12 要因間クロス表

(単位:秒)

A ₁	C ₁	C ₂	計	A ₂	C ₁	C ₂	計		C ₁	C ₂	計
B ₁	132.3	49.8	182.1	B ₁	82.1	26.3	108.4	B ₁	214.4	76.1	290.5
B ₂	57.7	0.4	58.1	B ₂	0	0	0	B ₂	57.7	0.4	58.1
計	190.0	50.2	240.2	計	82.1	26.3	108.4	計	272.1	76.5	348.6

行させ、初期条件の影響をなくするためはじめの1~40台を除いた残りの10台のバスのデータの集計であり、乱数を変えて10回くり返してある。組合せA₂B₂C₁、A₂B₂C₂では運行の乱れは全くなく、平均待時間は156.8秒と一定していて表から除外してあるが、この値を各欄の数値から差引き10回分を合計して表-12のように要因間クロス表に変換する。このようにすれば、これは実験計画法でいう三元配置の問題であり、これに対して分散分析表を作成すれば、表-13のように最終欄に各要因の寄与率が計算される。同表によればBの主効果、すなわちポアソン変動による寄与率が大きく、Aの走行時間の変動による寄与率は意外に小さい。これは3番系統のバス路線においては、出発初期におけるいくつかのバス停の乗客到着率が大きく、この間では区間走行時間の変動の幅が小さいという路線の特性が響いた結果であると思われる。次に要因Cの主効果はBについて大きい。この場合の寄与率は乗車人数の平均値を時間間隔に比例した値として与えるか、あるいはこれと無関係な一定値として与えるかの差異から生じる効果を意味していて、AやBの要因の主効果の寄与率に対する解釈とは異なっている。すなわち、A、Bについては水準として変動するかしないかとして、いわば1か0かという形で入れることができたから、寄与率はそのまま、たとえば、走行時間の変動が1人あたり平均待時間の増大に及ぼす寄与率といえたのであるが、Cについては、水準として1かそれ以外の何かという形で定めざるを得ず、寄与率

は時間間隔と乗車人数の間の比例傾向が待時間の増大におよぼす寄与率といえないのである。しかし相互効果としてそれぞれ、A×C、B×Cが有意であったことは、Cの要因がA、Bの要因による乱れの発生と相乗して待時間の増大をもたらしたといえ、このことは3章で説明した原理に対応しているものと考えられる。誤差変動eの項には棄却されたA×Bの相互効果などを含んでいるが繰返し間の変動が大部分を占めていて、全体の寄与率は約33%と最大である。このことは各回のシミュレーション結果の不安定さを物語っており、10台のバスのデータの集計というのはデータ数として不足であったといえよう。

バスの運行乱れの指標として別のものをとれば、各要因の寄与率はまた異なったものとなろう。特にここでは待時間を指標として選んだため、各バス停の乗客発生率等の路線の特性が影響して、区間走行時間の変動による寄与率が過少に評価されたきらいがある。特性の異なる他の路線、あるいは調査時間帯を変えるなどして今後検討してゆかねばならないと考えている。

### 6. おわりに

バス運行の乱れを運行時間間隔の変動としてとらえ、これに関係するいくつかのバス運行挙動について考察してきたが、運行挙動の全体をとらえ、これを一般化して説明することはむずかしく、対象を限定せざるを得ない部分も多かった。しかし運行乱れに関するいくつかの挙動については、本研究でかなり明確にできたと考えている。

バスの運行は本研究でも明らかにされたように、もともと不安定な機構を内在しているものであるが、街路の交通事情の悪化が不安定性を加速しているのが現状である。こうしたバス運行の乱れによって招来されるものは、バス停における利用者の待時間の増大、満員通過や

表-13 分散分析表

	自由度 df	変動 S	分散 V	分散比 F ₀	純変動 S'	寄与率 f(%)
A	1	217.14	217.1	23.8	208.02	9.3
B	1	675.12	675.1	74.0	666.0	29.9
C	1	478.24	478.2	52.4	469.12	21.1
A×C	1	88.20	88.2	9.7	79.08	3.6
B×C	1	82.01	82.1	9.0	72.89	3.3
e	75	684.01	9.1		729.61	32.8
T	80	2224.72			2224.72	100.0



積残しの頻発、バス車内の混雑度の激化等である。これらに対して、これまでの考察から運行安定化のための対策の方向といったものがいくつか指摘できる。まずバス停における現象は乱れの拡大、伝達と乱れの発生源としての役割を果たしているが、1人あたり乗降所要時間の短縮をはかることは、上記の役割を小さくする。したがって前に述べたバスの構造、料金徴集方法、乗務員数等を検討してこの短縮をはかることは運行安定化に有効に作用する方法であるといえよう。区間走行時間については、街路の交通事情が悪化している現在、本研究でみた以上に運行乱れの大きな要因になっていると考えられ、早急な対策を講じる必要がある。これに関して最近いくつかの都市で実施の動きがみられる、バスに優先通行権を与える方法が有効であろう。バス優先車線の設置、バス専用信号機の設置等によって走行時間の変動の幅をおさえることができるからである。こうした措置があげる効果は種々の関連事項についての検討が十分なされた上で評価されなければならないのであるが、運行の安定化という項目を忘れてはならない。

都市における大衆輸送機関としてのバスには、まだ捨て難い利点が数多く残されている。しかしその魅力が一方では消されつつあるというのも事実であり、上記の対策の他にもバス利用技術の開発という観点から、ダイヤ

ルバスシステム⁵⁾やリアルタイムでバスの運行を制御する方式⁶⁾もすでに紹介されている。われわれは本研究の発展をはかるとともに、これらのよりよいバス輸送サービスを実現させるための方法論についても考えてゆくつもりである。

本研究は佐野東隆氏との共同研究に始まり、研究の遂行にあたっては、京都大学米谷栄二教授、同佐佐木綱教授、同明神証助教授から有益な示唆を賜わり、またデータの整理等で京都大学院生青木和善氏に御協力をいただいた。ここに深謝の意を記す次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 河上省吾・米谷栄二：バス運転における遅延について、第8回日本道路会議論文集、日本道路協会、1966。
- 2) Kraft, W.H. and Boardman, T.J. : Predicting Bus Passenger Service Time, Traffic Engineering, October, 1969.
- 3) 米谷・渡辺・加藤・稲見：バスターミナルのホーム容量算定式の検討、第4回日本道路会議論文集、日本道路協会 1958。
- 4) 田口玄一：統計解析、丸善、1966。
- 5) 兼重一郎・渡辺 弘：デマンドバスシステムのロジック、日科技連オペレーションズ、リサーチ、Vol. 15, No. 10, 1970。
- 6) Hans Tappert : Improvement and Innovation in Urban Bus System, Proceedings of the first Technology Assessment Review, OECD, 1969.

(1971.8.11・受付)