

バス運行回数の決定方法について

吉 田 豊 穂

A Method to Determine the Efficient Frequency of Bus Operation

Toyoho YOSHIDA

Many bus companys have been brought to a crisis of their manag'ement because the development of motorization dropped the number of passeng'ers down recently. This theme was approached to the best method how they would decide the frequency of operation for the convenience of both passeng'ers and bus company manag'ement. Above all, this was applied to determine the optimum frequency of bus operation for the Red Cross Hospital Line in Fukui city.

1 はじめに

(1) 本研究の意義・目的

本研究はバス会社側の運行損益とバス利用者側の乗客待時間損失費用とを最小化することによりバス運行回数の決定方法について考究するものである。最近の都市交通における大衆の足としてのバスはモータリゼーションの進展によって自家用車の急激な氾濫をもたらしバス利用者は減少の一途を辿っている。このことはバス会社にとって収入の減少につながってくるから会社経営の存立すら危うくするものである。さらにはまた自動車交通の増大に伴う道路の計画的整備拡充の立ち遅れから随所で慢性的な運行乱れを引起している。それゆえこれが起因となってバス運行速度の低下となってあらわれるから、バスの回転運用を著しく悪くし配車台数を多くして運行経費の増大をまねている。バス会社にとっては運賃収入は減少し運行経費は増大するという収入と支出の両面から圧迫化され経営の危機に直面しているのである。バスは本来公共大量輸送機関であるから安全運転を遵守し利用者の利便を配慮するという公共的・社会的使命を荷ってはいるが、一方では他の産業と同じく利益を追及し採算性をとって会社経営の安定を計らなければならないことは当然といえよう。そして会社経営に余裕ができればこれがバス利用者へのサービス水準の向上にも役立ってくるものと期待できる。以上のような今日におけるバス会社の経営危機から考えてみるとバス運行回数についてはバス会社の経営が維持できるようその運行損益とバス利用者の利便とを配慮しながらどこかで両者の妥協点を見いださなければならないということになろう。バスの運行回数は多くなればなるほどバス会社の運行損益は収益から損失に代って次第に大きく

なっていく傾向を示すがこれに対してバス利用者にとっては待時間がだんだん少なくなりバス停留所へ到着するとすぐ乗車できるようになるから乗客待時間損失費用は小さくなっていく。そこでこの双方よりの総損失費用を計算し最小値をとらえて運行回数の妥協点としその最適解を求めんとするものである。

(2) 総損失費用について

運行回数はその増減に伴って乗客数に変動が考えられる。すなわち運行回数が多くなればあまり待たされずに乗車できるから便利になって自然増や他の交通機関から転稼してくるであろうし、また少いと他の交通機関へ転稼してしまうこともある。ゆえに運行回数の増減によって乗客数に変化があればバス運賃収入にも増減があると考えられるが、変化するとすればモデル修正が必要となるのでここでは運賃収入は固定値として取扱うことにする。運行経費はバスを営業運転するための必要な費用であってこのなかには人件費・修繕費・維持費・償却費・燃料費・税金・その他が含まれる。したがって運行損益は運行経費から固定値としての運賃収入を差引いた値であってこの損益が負になるときはバス会社に収益があるときである。また乗客待時間損失費用については乗客待時間総和に時間価値を乗じて求めることができる。この乗客待時間損失費用にバス会社損益を加えた値が総損失費用である。

(3) 最適運行回数について

バス会社損益と乗客待時間損失費用は運行回数の増減によって大きく影響されるので最適運行回数を求めるためにその相互関係の一般的傾向を示すと次の3とおりに分類することができる。

1) 収益が全く無い場合

図-1に示すように不採算路線の典型的な例であってバスを何回運行させても常にバス会社に収益の無い場合である。バス会社損益は運賃収入よりも運行経費が大となるので運行回数の増加にしたがって次第に損失費用が増大する。これに対して乗客待時間損失費用は運行回数の増加に伴って待時間が少なくなるからだんだん小さくなっていく。その総損失費用の最下位となるところを最適運行回数とする。

2) 運行回数により収益がある場合

図-2に示すようにバスをある程度まで運行させている間はバス会社に収益をもたらすが、それ以上にあまり多く運行させると収益が無くなる場合である。乗客待時間損失費用は図-1と全く同じ傾向を示すことになるからその総損失費用の最下位となるところを最適運行回数とする。

3) 運行回数に関係なく収益がある場合

図-3に示すように採算路線の典型的な例であってバスを何回運行させてもほぼ満員の

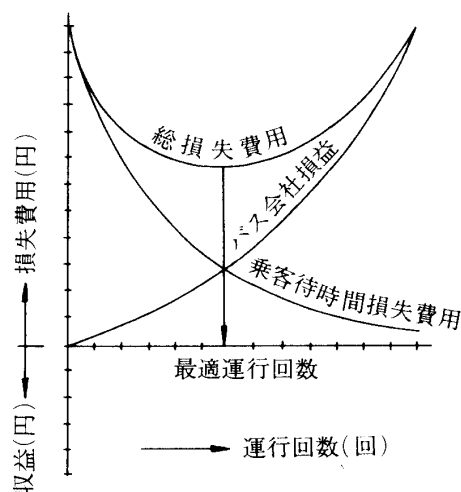


図-1 収益が全く無い場合

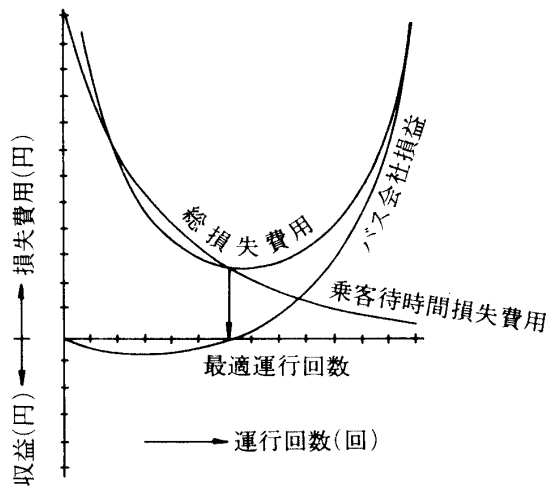


図-2 運行回数により収益がある場合

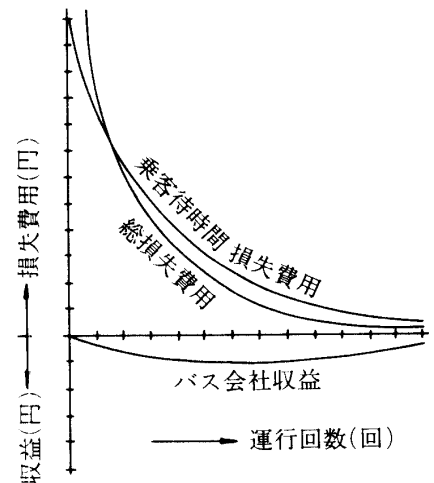


図-3 運行回数に関係なく収益がある場合

状態で走行し、常にバス会社に収益のある場合である。全国に約350のバス会社が存在するが不採算路線を多くかかえているのでその殆んどが赤字経営となっている。しかしながら各バス会社において幾系統か運行している路線系統のうちである路線系統についてみるとこのような状態を示す路線系統もある。ただし本研究の対象とはならない。

2 待時間と総損失費用の算定について

図-4において、時刻 $t_0 = 0$ より時刻 T までの間にバスを n 台運行させるとき、第 i 番目のバスを時刻 t_i で発車させると乗客の総待時間 $W(n \cdot T)$ は次のようにして求めることができる。ただし、最終バスの発車時刻 t_n は T とする。

$$W(n \cdot T) = \int_0^{t_1} f(t) \cdot (t_1 - t) dt + \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot (t_2 - t) dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t) \cdot (t_n - t) dt = \sum_{k=1}^n \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t) \cdot (t_k - t) dt \quad (1)$$

ここで、 k ：バス運行台数（台）

t_k ： k 番目に発車するバス時刻($k = 1, 2, 3, \dots, n$)

t_{k-1} ： k 番目より1つ前に発車するバス時刻($k = 1, 2, 3, \dots, n$)

乗客の積残しはしてはならないから式(2)のような制限条件を付ける。

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t) dt \leq C \quad (2)$$

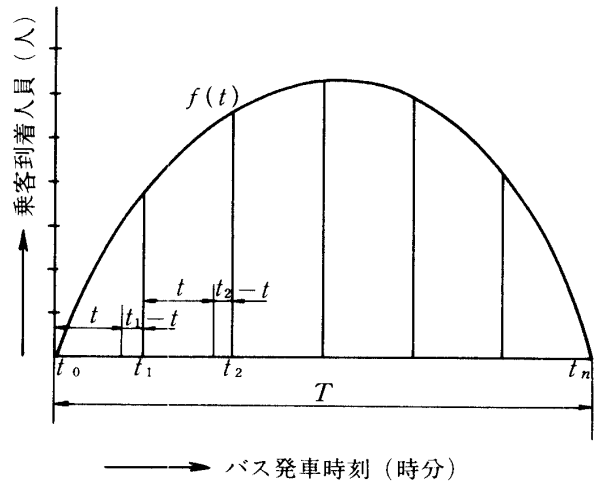


図-4

ここで C : バス 1 台あたりの乗客定員

乗客の総待時間損失費用 $Q(n)$ は次式で得られる。

$$Q(n) = W(n \cdot T) \delta \quad (3)$$

ここで, δ : 時間価値 (円/分)

バスを n 台運行させるときのバス会社損益 (収益の場合もある。このときは負で表わされる。) を $M(n)$ とすると, 総損失費用 $L(n)$ は式 (4) で示される。

$$L(n) = Q(n) + M(n) = W(n \cdot T) \delta + M(n) \quad (4)$$

問題は式 (2) の条件式のもとに $L(n)$ を最小化する n を求めることである。すなわち

$$L(n) \rightarrow \text{Minimum} \quad (5)$$

$$\text{Sub.to } \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t) dt \leq C \quad (6)$$

このとき, バス発車時刻 t_k は

$$W(n \cdot T) = W(n \cdot t_n) = \min \left\{ \sum_{k=1}^n \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t) (t_k - t) dt \right\} \quad (7)$$

なるよう決定されている。

図-5 において, 時刻 t_{k-1} より t_k までの乗客総待時間を $G(t_{k-1} \cdot t_k)$ とすると,

$$G(t_{k-1} \cdot t_k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t) (t_k - t) dt \quad (8)$$

$W(n \cdot T)$ は動的計画法 (Dynamic Programming) を用いて解くことができる。DP の繰返し関係式は式 (9) のとおりである。

$$W(k \cdot t_k) = \min [G(t_{k-1} \cdot t_k) + W(k-1 \cdot t_{k-1})] \quad (9)$$

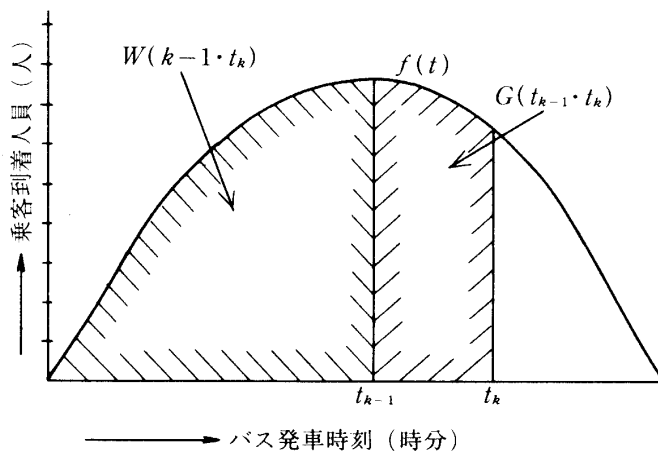
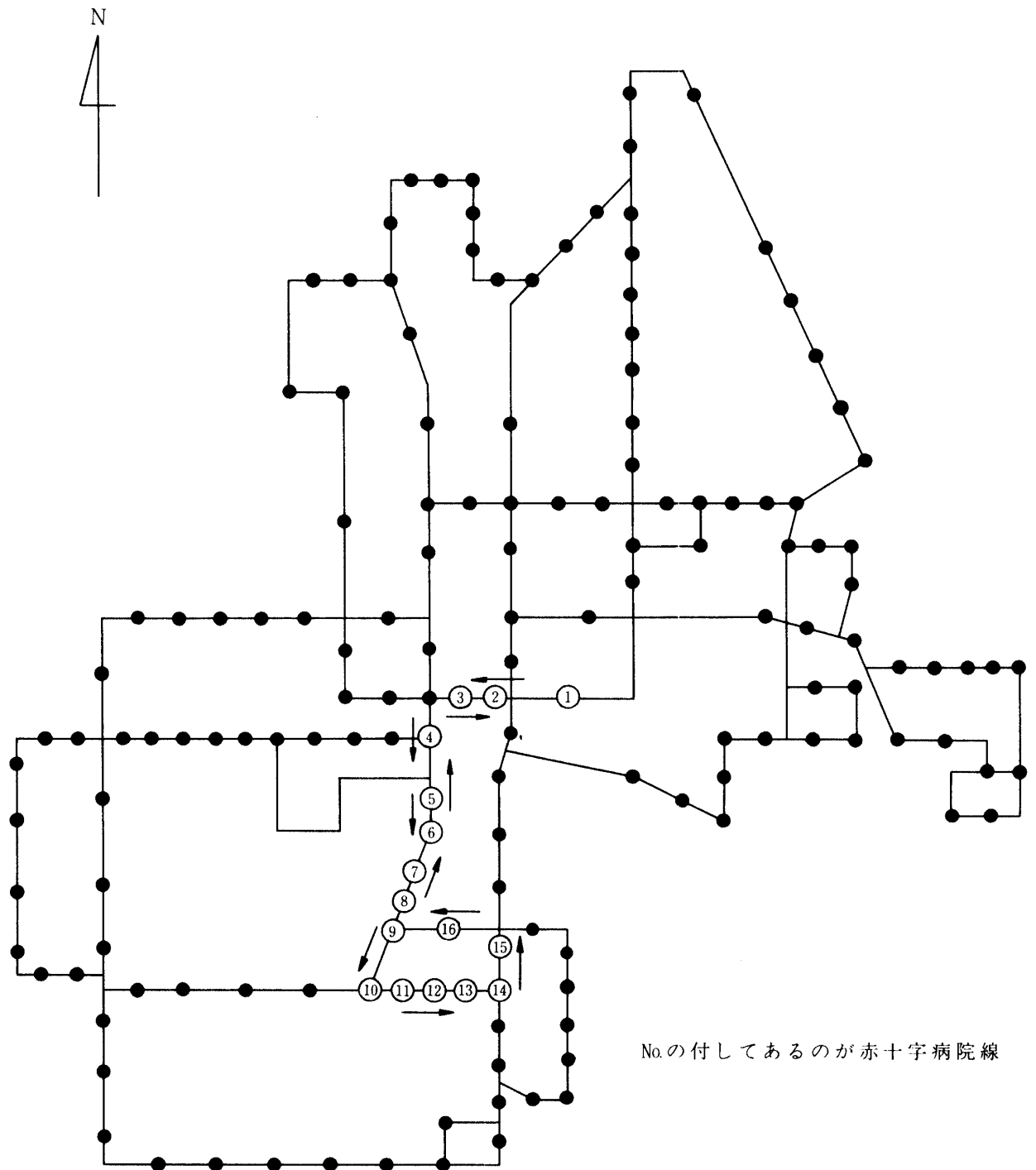


図-5



図－6 福井市内バス路線網図

表-1 OD調査表

調査日 昭和54年6月20日 単位：人

(8 番のりば) 赤十字病院線	① 福井 駅前	② 東 映 前	③ 片 町 入 口	④ 久 保 町	⑤ 左 内 公 園	⑥ 公 園 下	⑦ 不 動 山 口	⑧ 山 奥 町 入 口	⑨ 山 奥	⑩ 藤ヶ丘 団地入口	⑪ 藤ヶ丘	⑫ 南 局 前	⑬ 赤十字 病院	⑭ 福井新 口	⑮ 大和紡 前	⑯ 豊二丁 目	⑰ 山奥	⑱ 不 動 山 口	⑲ 公 園 下	⑳ 左内公 園	㉑ 久保 町	㉒ 片町入 口	㉓ 東映 前	㉔ 福井駅 前	合 計
①福井駅前			14	35	24	26	180	91	14	50	19	43	243	2	3	3	3	3					1	2	756
②東映前				1			6	5	2	1		1	7												23
③片町入口						1	32	9	4	12	1	11	30	1	2	1						1			105
④久保町						1	5	3	1	2	1	1	28	5	5										52
⑤左内公園								1	1		3	3	13		1										22
⑥公園下									1	1	2	2	3		1										10
⑦不動山口										1			5												6
⑧山奥町入口										2			4		1										7
⑨山奥													3										1		4
⑩藤ヶ丘団地入口					1								3		1								3	8	16
⑪藤ヶ丘													5		1	1			3		2	4	6	28	50
⑫南局前													1		1		2		1	2	3	3	11	23	47
⑬赤十字病院	1														1	2	6	7	2	8	33	36	44	220	360
⑭福井新口			1													2			1	2	5	9	3	25	48
⑮大和紡前			1																2	2	5	3	6	29	48
⑯豊2丁目																				1	3	12	4	7	27
⑰山奥																					1	14	14	38	67
⑱不動山口																				1	7	21	35	104	168
⑲公園下																					1		4	9	14
⑳左内公園												1											5	10	16
㉑久保町																						2		18	20
㉒片町入口													2											12	14
㉓東映前																		1							1
㉔福井駅前											1				1		3	4			1				10
合 計	1		16	36	25	28	223	109	23	69	27	62	347	8	18	9	14	15	9	16	61	105	136	534	1891

表-2 乗車券別乗車人員表

単位 人

発車時刻	通勤	通学	優待	回数	車内	計
6:56						
7:27	1		1		3	5
7:44	1	5		4	7	17
7:59	2	8	1	7	12	30
8:06		3	1	5	10	19
8:22		1	1	3	12	17
8:39	1	1		3	13	18
8:55		1		5	16	22
計	5	19	4	27	73	128

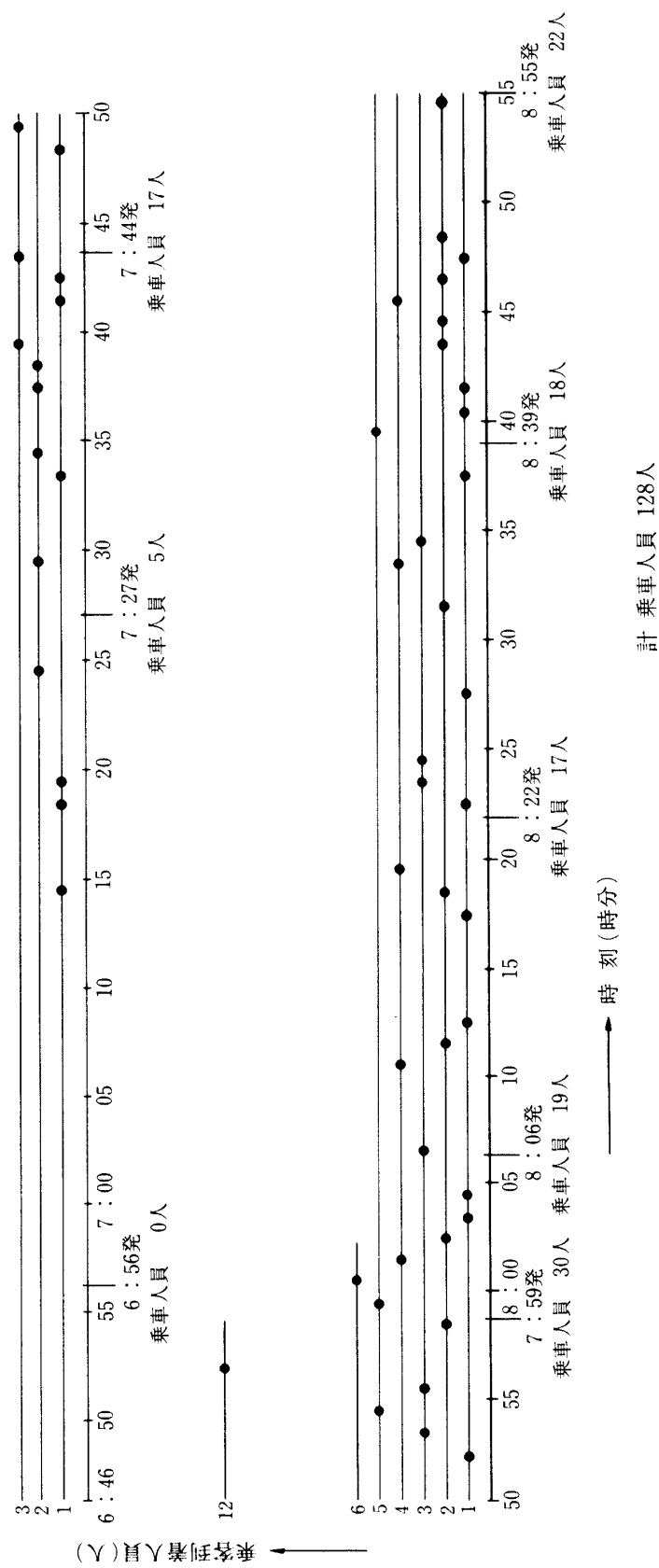


図-7 1 分間あたり乗客到着人員 調査年月日 昭和54年9月20日

3 具体的計算例について

福井市における市内バスは17路線系統運行しているが、このうち赤十字病院線の朝のラッシュ時間について最適運行回数算定の具体的計算例を示す。図-6は福井市内バス路線網について赤十字病院線の系統図を示したものであり、また表-1は昭和54年6月20日に京福電鉄KK福井支社自動車部によって調査したOD表である。表-1のOD調査表によると1日あたりの乗車人員は1,891人であり、うち福井駅前乗車が756人で一番多く、また降車人員でも534人であって乗降人員ともに他のバス停留所より圧倒的に多いので福井駅前バス停留所を本研究のベースとして考究する。昭和54年9月20日に福井駅前バス停留所において始発バス発車10分前の6時46分より朝のラッシュ時間の最終である8時55分まで連続して1分間あたりの乗客到着人員と乗車券別による乗車人員の調査を実施したがこれを図-7、表-2に示す。

図-7によると始発バス6時56分は到着人員が無く空車で発車しており、8時55分発までの運行回数は8回であって乗車人員は128人である。

(1) 乗客待時間の計算

図-7の1分間あたりの乗客到着人員を5分間あたりの到着人員にまとめたのが図-8のグラフである。

このグラフでは図のように時刻別による乗客到着人員の変化がはげしく、直線の方程式が多数できるので計算が複雑化するから図-9の第1案、図-10の第2案の2つうりのようにグラフの修正を行う。この計算においては乗客到着人員の時刻分布は運行回数を変更しても不変であるとし、また乗客到着人数の最高が7時55分より8時00分までに22人であるから福井駅前バス停留所での乗客定員を25人として計算を進める。したがって福井駅前バス停留所の乗車人員は128人であるからバスを7台以上運行させないと積残しをおこすことになるから、0分より105分までの間に7台より15台まで運行させたときの乗客待時間最小値を式(2)の制限条件のもとに式(8)、(9)を

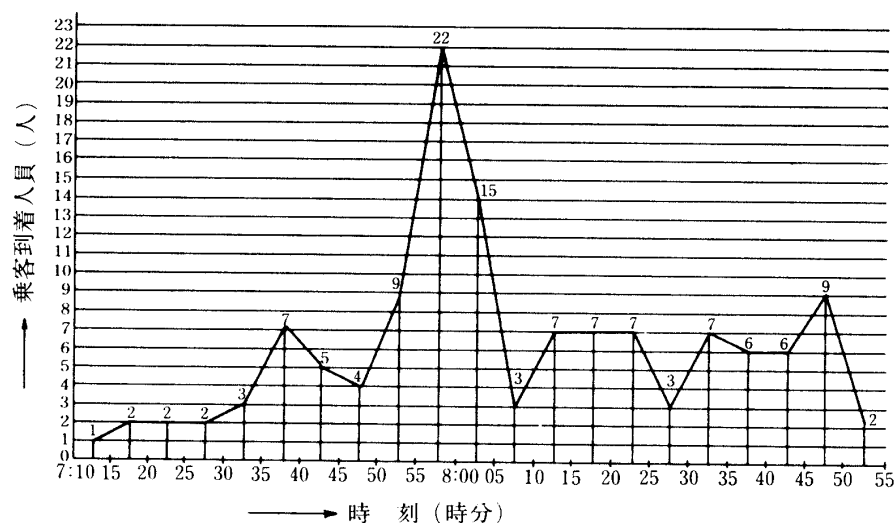
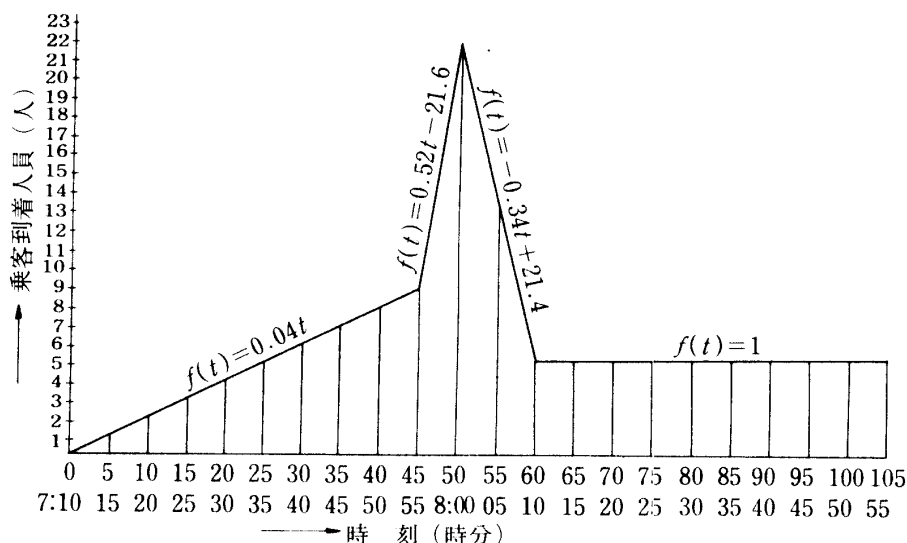


図-8 5分間あたり乗客到着人員グラフ

用いて求めると次のとおりである。ただし、途中の計算は省略し最終の計算結果のみ記載する。
そして表－3にこれを示す。



図－9 第1案時刻別乗客到着人員グラフ

第1案の計算

バス乗客総数 D は

$$D = \int_0^{45} 0.04t dt + \int_{45}^{50} (0.52t - 21.6) dt + \int_{50}^{60} (-0.34t + 21.4) dt + \int_{60}^{105} 1 dt$$

$$= 40.5 + 15.5 + 27 + 45 = 128 \text{人}$$

$n = 7$ バスを0分より105分の間に7台運行させたときの乗客待時間最小値の計算

$$W(7 \cdot 105) = G(90 \cdot 105) + W(6 \cdot 90) = \frac{5192.5}{6} = 865 \text{分}$$

$$n = 8 \quad W(8 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(7 \cdot 95) = \frac{4465}{6} = 744 \text{分}$$

$$n = 9 \quad W(9 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(8 \cdot 95) = \frac{4015}{6} = 669 \text{分}$$

$$n = 10 \quad W(10 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(9 \cdot 95) = \frac{3580}{6} = 597 \text{分}$$

$$n = 11 \quad W(11 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(10 \cdot 100) = \frac{3302.5}{6} = 550 \text{分}$$

$$n = 12 \quad W(12 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(11 \cdot 100) = \frac{3047.5}{6} = 508 \text{分}$$

$$n = 13 \quad W(13 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(12 \cdot 100) = \frac{2852.5}{6} = 475 \text{分}$$

$$n = 14 \quad W(14 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(13 \cdot 100) = \frac{2687.5}{6} = 448 \text{分}$$

$$n = 15 \quad W(15 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(14 \cdot 100) = \frac{2537.5}{6} = 423 \text{分}$$

第2案の計算

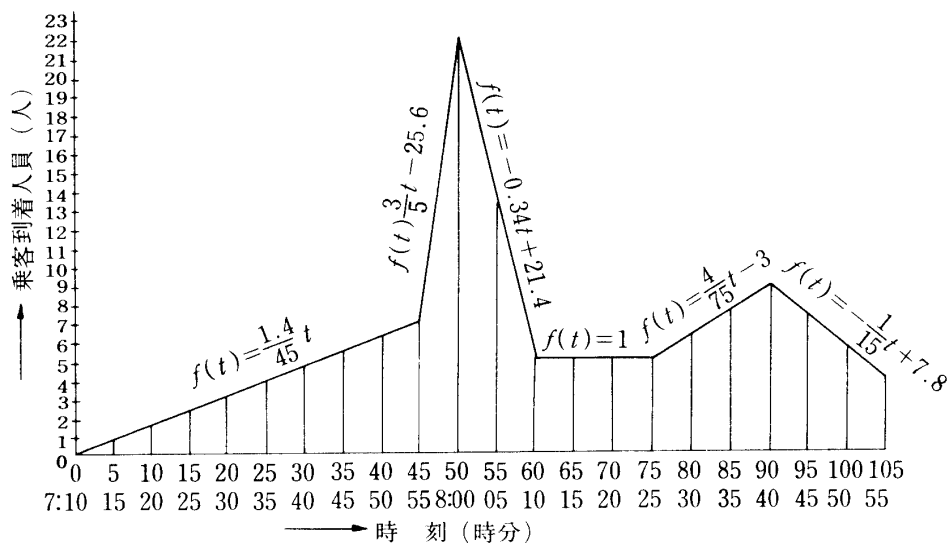


図-10 第2案時刻別乗客到着人員グラフ

 バス乗客総数 D は

$$\begin{aligned}
 D &= \int_0^{45} \frac{1.4}{45} t dt + \int_{45}^{50} \left(\frac{3}{5} t - 25.6 \right) dt + \int_{50}^{60} (-0.34t + 21.4) dt + \int_{60}^{75} 1 dt + \int_{75}^{90} \left(\frac{4}{75} t - 3 \right) dt \\
 &\quad + \int_{90}^{105} \left(-\frac{1}{15} t + 7.8 \right) dt \\
 &= 31.5 + 14.5 + 27 + 15 + 21 + 19.5 = 128.5 \text{ 人}
 \end{aligned}$$

$$n = 7 \quad W(7 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(6 \cdot 95) = \frac{120187.5}{135} = 890 \text{ 分}$$

$$n = 8 \quad W(8 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(7 \cdot 95) = \frac{100500}{135} = 744 \text{ 分}$$

$$n = 9 \quad W(9 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(8 \cdot 95) = \frac{88125}{135} = 653 \text{ 分}$$

$$n = 10 \quad W(10 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(9 \cdot 95) = \frac{80531.25}{135} = 597 \text{ 分}$$

$$n = 11 \quad W(11 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(10 \cdot 95) = \frac{72918.75}{135} = 540 \text{ 分}$$

$$n = 12 \quad W(12 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(11 \cdot 95) = \frac{68193.75}{135} = 505 \text{ 分}$$

$$n = 13 \quad W(13 \cdot 105) = G(95 \cdot 105) + W(12 \cdot 95) = \frac{63731.25}{135} = 472 \text{ 分}$$

$$n = 14 \quad W(14 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(13 \cdot 100) = \frac{59343.75}{135} = 440 \text{ 分}$$

$$n = 15 \quad W(15 \cdot 105) = G(100 \cdot 105) + W(14 \cdot 100) = \frac{55931.25}{135} = 414 \text{ 分}$$

表－3 乗客総待時間の値 $W(n \cdot T)$

運行台数 (台)	第1案の乗客 最小待時間(分)	第2案の乗客 最小待時間(分)
7	865	890
8	744	744
9	669	653
10	597	597
11	550	540
12	508	505
13	475	472
14	448	440
15	423	414

表－4 乗客総待時間損失費用の値 $Q(n) = W(n \cdot T) \delta$

運行台数 (台)	第1案の乗客待時間 損失費用(円)	第2案の乗客待時間 損失費用(円)
7	5,190	5,340
8	4,464	4,464
9	4,014	3,918
10	3,582	3,582
11	3,300	3,240
12	3,048	3,030
13	2,850	2,832
14	2,688	2,640
15	2,538	2,484

(2) 乗客待時間損失費用の計算

上記乗客総待時間 $W(n \cdot T)$ をもとに各バス運行台数ごとの乗客総待時間損失費用 $Q(n)$ は待時間価値 $\delta^1) = 6$ 円/分として式(3)により求めると表－4のとおりである。

(3) バス運賃収入の計算

赤十字病院線は均一料金区間として1回の乗車で100円であり、また1箇月の通勤定期は片道運賃の45倍、通学定期は同じく35倍と定められているから4,500円/月と3,500円/月である。表－2の乗車券別による乗車人員により6時56分発より8時55分発までの8回の運行回数による運賃収入は下記のように11,535円となる。この運賃収入はここでは運行回数が15回まで増加しても固定値として扱うことにする。

通勤定期	$5 \text{ 人} \times \frac{4,500 \text{ 円/月}}{25 \text{ 日} \times 2 \text{ 回}} = 450 \text{ 円}$
通学定期	$19 \text{ 人} \times \frac{3,500 \text{ 円/月}}{25 \text{ 日} \times 2 \text{ 回}} = 1,330 \text{ 円}$
優待券	$4 \text{ 人} \times 0 \text{ 円} = 0 \text{ 円}$
回数券	$27 \text{ 人} \times \frac{1,000}{11 \text{ 回}} = 2,455 \text{ 円}$
車内券	$73 \text{ 人} \times 100 \text{ 円} = 7,300 \text{ 円}$
計128人	計11,535円

(4) 運行経費の計算

京福電鉄KKにおいて株主総会の席上配布された第74回事業報告書の損益計算書の自動車業のみ表－5に示す。

京福電鉄KKは本社は京都市にあって福井市にあるのは支社である。本社では鉄軌道のみ営業しておりバス営業はしていないからこの損益計算書の自動車業は全部福井支社の営業実績ということになる。また自動車業といってもこのなかには現在運行している定期バス228台と貸切バス

49台についての損益計算書であって、本研究においては貸切バスは対象外となるので定期バスのみに対する損益計算書については次のとおりである。

定期バスの損益計算書	
営業収益	3,000,000 千円
営業費(運行経費)	3,593,000 千円
営業損失	593,000 千円

表-5 損益計算書

(昭和54年4月1日から
昭和55年3月31日まで)

科 目	金 額	
経常損益の部	円	円
(営業損益の部)		
鉄 軌 道 業		
営 業 収 益		
営 業 費		
営 業 損 失		
自 動 車 業		
営 業 収 益	3,616,063,458	
営 業 費	4,250,149,558	
営 業 損 失		634,086,100

上記のように定期バスにおいて約6億円の営業損失を計上している。これに対してはバスは国民大衆の最後の足であるといわれているように会社経営が赤字であってもバス営業は存続させなければならず特に経済的・身体的理由により自家用車を持てない人々にとっては日常生活圏を破壊されることになるから損失額に対する助成費として路線維持費補助金やその他地方公共団体からも補助金の交付を受けているが赤字額全部をうめるまでには至っていない。福井市内バスは7時より9時までのラッシュ時間において定期バス228台のうち47台のバスが運行しているが、昼間になると乗降人員の減少に伴って運行回数を少くしているからバス配車台数に余裕があるのでバスの回転運用を高めるためその一部は郊外バス路線へ転用している。したがって福井市内バスだけについての運行経費は算出できないから全部の定期バス228台を対象とし、その運行時間を6時30分より21時30分までの15時間として運行経費を求めると次のとおりである。

$$\text{バス1台あたり1分間の運行経費} = \frac{3,593,000,000 \text{ 円/年}}{228 \text{ 台} \times 365 \text{ 日} \times 15 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分}} = 48 \text{ 円}$$

赤十字病院線の所要時間は29分であるからバス1台運行するときは48円×29分=1,392円の運行経費となる。

(5) 総損失費用の計算

(1)より(4)までの計算書にもとづき総損失費用の計算を行うと第1案については表-6, 第2案については表-7であり, これを図-11, 図-12に図示する。総損失費用が最小となる運行回数は両案とも7回を示すことになるからこれが最適運行回数である。

表－６ 第１案による総損失費用の値

運行台数(台)	運行経費(円)	運賃収入(円)	損 益(円)	待時間損失費用(円)	総損失費用(円)
7	9,744	11,535	－ 1,791	5,190	3,399
8	11,136		－ 399	4,464	4,065
9	12,528		993	4,014	5,007
10	13,920		2,385	3,582	5,967
11	15,312		3,777	3,300	7,077
12	16,704		5,169	3,048	8,217
13	18,096		6,561	2,850	9,411
14	19,488		7,953	2,688	10,641
15	20,880		9,345	2,538	11,883

表－７ 第２案による総損失費用の値

運行台数(台)	運行経費(円)	運賃収入(円)	損 益(円)	待時間損失費用(円)	総損失費用(円)
7	9,744	11,535	－ 1,791	5,340	3,549
8	11,136		－ 399	4,464	4,065
9	12,528		993	3,918	4,911
10	13,920		2,385	3,582	5,967
11	15,312		3,777	3,240	7,017
12	16,704		5,169	3,030	8,199
13	18,096		6,561	2,832	9,393
14	19,488		7,953	2,640	10,593
15	20,880		9,345	2,484	11,829

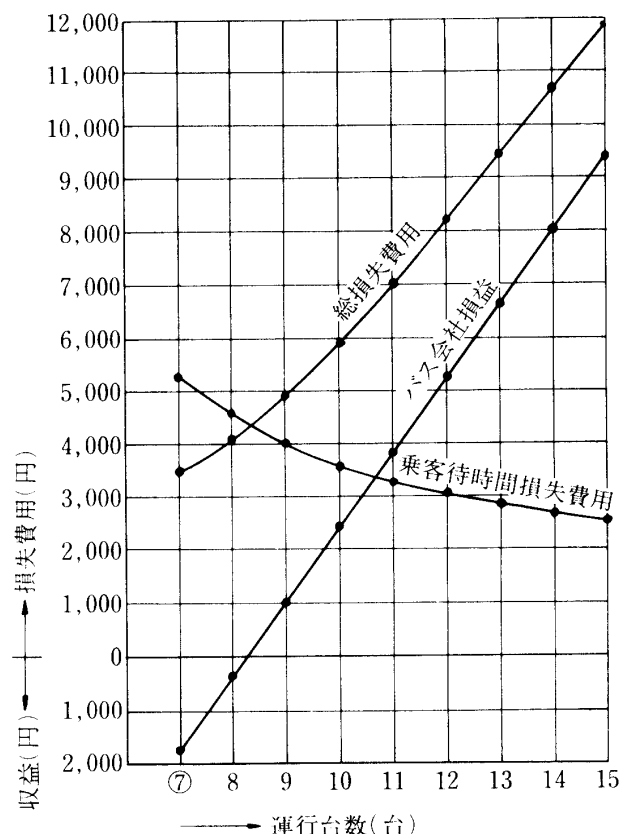


図-11 第1案による総損失費用グラフ

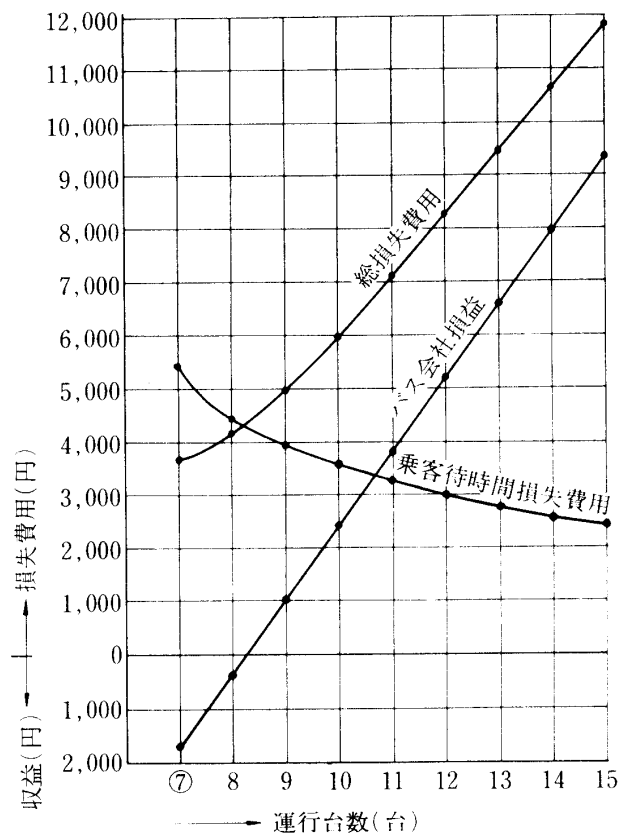


図-12 第2案による総損失費用グラフ

4 ま と め

本研究においてバス利用者の利便を配慮しながらバス会社の経営危機に焦点をあてて運行回数の決定方法について論じたが、現行のバス運行回数8回に対して計算結果では7回であるから妥当な回数であるといえよう。本研究の遂行にあたって最適運行回数を求めるために赤十字病院線では一番乗車人員の多い福井駅前バス停留所のみについて考究したが、この計算結果をもとにいきなり最適運行回数であると断定することはできない。なぜならば次に乗車人員の多い赤十字病院前バス停留所や1日あたりの乗車人員が100人を越える片町入口・不動山口バス停留所でも同様の調査・計算を行ってこれをもとに総合的な判断を下さなければならないことは当然であろう。ただし、圧倒的に乗車人員の多い福井駅前バス停留所について論述すれば以上のとおりである。

謝 辞

終りに本研究につきましては、終始懇切な御指導を賜りました金沢大学工学部建設工学教室 工博 飯田恭敬教授に対して深甚なる謝意を表します。また本研究の計算を担当しました本学昭和55年度卒研究生建設工学科土木専攻清水・柴・白井・宮沢の4君に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 越 正毅：交通における時間価値 新交通システム1978・10
- 2) 飯田・吉田：バス発車時刻の最適化について 福井工大研究紀要第10号 1980・10