土木学会論文報告集
第 238 号・1975 年 6 月

バス輸送改善のための基礎的考察

BASIC STUDY ON THE IMPROVEMENT OF BUS TRANSPORTATION SYSTEM

森 地 茂*・岩 井 壮 三**・鈴 木 純 夫***
By Shigeru MORICHI, Sozo IWAI and Sumio SUZUKI

1. 序　論

都市内，特に大都市におけるバス輸送は路面電車の撤廃に伴い，都市内交通機関，アクセス交通機関としての相対的必要性を増していると考えられるにもかかわらず，そのサービス水準低下が著しく，経営悪化をきたしている。本論文は，このバス輸送改善のための基礎的研究として，各種バス運行改善策の評価およびバス路線再編の2項目に関する基礎的手法を提示するものである。

まず第1にバス運行改善対策として，バス優先，専用レーン，優先信号，バス車両構造の改良など各種提案や試験的実施がなされているが，その効果は実施路線により大きく異なり，各対策についての評価は定まらない段階にあるといえる。特に総合的対策を実施するためには，各対策の相対的比較評価が必要不可欠である。本論文ではバス運行挙動の分析を試み，さらにバス運行の信頼性を統一尺度として，上記各種対策の評価の1手法を提示する。

第2に，バス路線網は，地下鉄，モノレールなどの建設や路面電車の撤廃による都市内交通体系の変革に合わせ，その再編の必要性が高まっている。バス路線網の構成手法は，次節で述べるようにいくつか提案されてはいるが，実用的方法として確立されるに至っておらず，従来担当者の経験による路線選定が中心であった。さらにその路線の再編が十分実行されないため，非合理性を増加させているという状況下にあるといえよう。本論文では，バス路線構成手法の第一段階として，グラフ理論で用いられるインシデンス行列，パス行列に追加して2，3の行列を定義することにより，需要に合致したバスルート設定問題の定式化を行うこととする。

* 正 会 員　東京工業大学助教授　工学部土木工学科
** 正 会 員　東京都建設局第二建設事務所
*** 学生会員　東京工業大学大学院　社会工学科

以上に述べた2つの側面からのバス輸送問題の分析が本論文の目的と内容である。

2. 従来の研究

バス運行挙動に関しては，河上・米谷が遅延時間およびだんご運転の定式化を行っているが[1]， 先行バスと後続バスの運転間隔と停留所の乗客数の関係に起因する，遅延の伝播については扱っていない。高岸・戸松はこの現象に着目し，運行時間間隔の拡大，縮少現象の定式化を行っている[2]。 この定式化は，区間 i におけるバス $(j-1)$ と j の運転間隔 x_{ij} についてその乱れの伝達現象を解明したものであり，これを組み込んだシミュレーションモデルによりバス運行挙動を解明することを試みている。これらの研究は，バス運行の分析に主眼点をおいているのに対し，各種バス運行改善策の評価や提案を目的とする研究は天野・銭谷の研究をはじめ数多く存在する[3)~6)]。しかし，バス運行挙動の定式化を組み込み，かつ複数のバス運行改善策を相互に比較した研究は少ない。

一方，本論文の第2の目的であるバスルート構成問題に関する研究はきわめて数少ない。道路網，鉄道網の構成問題に関する研究が非常に多数存在するのと対象的といえよう。従来，交通計画研究の主たる対象が施設計画およびその基礎となる分析にあったことにも，その原因があろうが，リンク・ノードの 1-0 表示として結果の出しうる道路網，鉄道網計画に対し，バスルートは同一リンクを通る複数ルートが存在し，最適化問題としてはるかかに複雑となることにもその理由があると考えられる。この問題についての研究として， W. Lampkin は通過点をあらかじめ与えることにより問題を単純化した近似解法を示した[7]。 ワシントン大学のグループによる一連の研究[8),9)] は，グラフィック・ディスプレイ装置を用いて，ルート網代替案の評価を迅速なものとしたが，代替

案の決定方法に関しては特徴的といいがたい。飯田・吉田はバスルートをあらかじめ想定し，各ルートの運行回数を決定する方法を提示している[10]。バスルートを最大数想定しておくことにより，この方法はバスルート構成問題の解法として用いうるものであるが，この研究では利用者が目的地へ行く複数のバス系統のうちどれを利用するかという，バス選択特性が考慮されていない。バス路線構成問題と類似の問題にデマンドバスの走行経路決定問題がある。この問題は，路線バス問題より複雑であるが，リアルタイムで解を出す必要があるため，待ち時間，所要時間の制約を満たす解を短時間で求めることに重点がおかれ，経路の最適性は二義的問題として扱われている。以上のほかにも末尾に示すようにいくつかの研究があるが，バス路線再編を対象とする実用的方法が開発されるには至っていない。

3．バス運行改善策の評価方法

(1) バス運行挙動の定式化

バスの遅れは伝播されて，走行時間変動や運転間隔変動を大きくする。この現象は次のように定式化できる。

あるバス j が停留所 i に到着する遅れを Δ_{ij}，停留所 i での乗客発生量を λ_i 人/分，一人当り乗車必要時間を a 分/人とする。Δ_{ij} が生じたことによってひき起こされる遅れ $\Delta_{i+1,j}$ を1次の遅れ，$\Delta_{i+1,j+1}$ を2次の遅れ，$\Delta_{i+1,j+2}$ を3次の遅れとし以下4次以下の遅れを同様に定義する。Δ_{ij} は次の関係式により決定される。

$$\Delta_{ij}=f(\Delta_{i-1,j},\ \Delta_{i-1,j-1},\ \Delta_{i-1,j-2},\ \cdots)\ \cdots\cdots(3.1)$$

バス j が停留所 $i-1$ に $\Delta_{i-1,j}$ 分遅れて到着すると，その遅れ時間中に $i-1$ に到着する乗客 $\lambda_{i-1}\cdot\Delta_{i-1,j}$ 人によってさらに $a\cdot\lambda_{i-1}\cdot\Delta_{i-1,j}$ 遅れ，この遅れ時間中に到着する乗客 $a\cdot\lambda^2{}_{i-1}\cdot\Delta_{i-1,j}$ 人によってさらに遅れることとなる。したがって1次の遅れは式 (3.2) のように表わされる。

$$\begin{aligned}\Delta_{i,j}&=\Delta_{i-1,j}+a\cdot\lambda_{i-1}\cdot\Delta_{i-1,j}\\&\quad+a^2\cdot\lambda^2{}_{i-1}\cdot\Delta_{i-1,j}+a^3\cdot\lambda^3{}_{i-1}\Delta_{i-1,j}+\cdots\\&=\frac{1}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.2)\end{aligned}$$

次に2次の遅れについて考えると，バス $j-1$ が停留所 $i-1$ に $\Delta_{i-1,j-1}$ だけ遅れて到着すると，上式により，$\Delta_{i,j-1}$ は，$\dfrac{1}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}$ だけ遅れる。これによりバス j の停留所 $i-1$ における乗客は $\dfrac{\lambda_{i-1}}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}$ 人だけ減少し，$i-1$ の出発時間は $\dfrac{a\lambda_{i-1}}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}$ だけ早くなる。この時間内に停留所に到着するべき乗客 $\dfrac{a\lambda^2{}_{i-1}}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}$ だけ利用者が減少し，出発時間は，さらに $\dfrac{a^2\lambda^2{}_{i-1}}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}$ だけ早くなり，この時間に到着するべき乗客が減少する。したがって，2次の遅れも，1次の遅れと同様等比級数となり次式で表わされる。

$$\begin{aligned}\Delta_{ij}&=-\frac{a\lambda_{i-1}}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}-\frac{a^2\lambda^2{}_{i-1}}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j-1}-\\&\quad\cdots=-\frac{a\lambda_{i-1}}{(1-a\lambda_{i-1})^2}\Delta_{i-1,j-1}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.3)\end{aligned}$$

3次以下の遅れも同様に定式化でき，k 次の遅れは，式 (3.4) で表わされる。

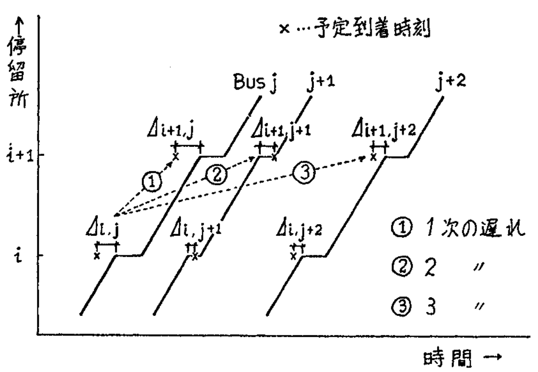
$$\Delta_{ij}=\frac{(-a\lambda_{i-1})^{k-1}}{(1-a\lambda_{i-1})^k}\Delta_{i-1,j-k+1}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.4)$$

ここで $a\lambda_{i-1}$ は1人当り乗車必要時間（分/人）と乗客の平均到着率（人/分）の積であり，$a\lambda_{i-1}\geq 1$ の場合は，1人の乗客が乗車中に1人以上の利用者が到着するのでバスは発車できないことになる。したがって $a\lambda_{i-1}<1$ という条件はバス運行上，一般に満たされていると仮定した。

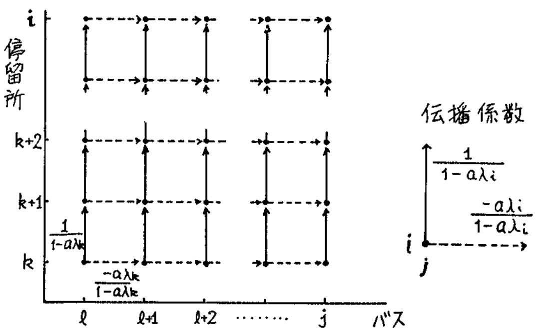
バス j の停留所 i への到着遅れ Δ_{ij} は $\Delta_{i-1,j}$ の1次の影響，$\Delta_{i-1,j-1}$ の2次の影響，$\Delta_{i-1,j-2}$ の3次の影響，$\Delta_{i-1,j-k+1}$ の k 次の影響の和であるから，式 (3.1) は次のように書くことができる。

$$\begin{aligned}\Delta_{ij}&=\frac{1}{1-a\lambda_{i-1}}\Delta_{i-1,j}-\frac{a\lambda_{i-1}}{(1-a\lambda_{i-1})^2}\Delta_{i-1,j-1}\\&\quad+\cdots+\frac{(-a\lambda_{i-1})^{k-1}}{(1-a\lambda_{i-1})^k}\cdot\Delta_{i-1,j-k+1}+\cdots\\&\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.5)\end{aligned}$$

この漸化式を用いて，バスの遅れの伝播を計算するためには，次の様に図形を用いるのが便利である。バスの運行を示す **図—1** を模式化し，**図—2** の様な伝播係数の配列を考える。ここで伝播係数とは $\dfrac{1}{1-a\lambda_i}$，$\dfrac{-a\lambda_i}{1-a\lambda_i}$ を意味する。いまある区間 k でバス l に生じた遅れを $X_{k,l}$ と書くことにする。区間 k とは停留所 $(k-1)$ と k との間である。$X_{k,l}$ によって生ずる $\Delta_{k,l}$ と $X_{k,l}$ は



図—1 バスの遅れの伝播



図—2 伝播式の解法のアナロジー

等しいが，$X_{k,l}$ によって生ずる $\varDelta_{i,j}(k\leqq i,\ l\leqq j)$ は $X_{k,l}$ が拡大されたものである。$X_{k,l}$ が $\varDelta_{i,j}$ に及ぼす影響は，図—2 において点 (k, l) から (i, j) に至る各経路についての影響の和に等しく，ある経路についての影響は，この経路に含まれるリンクの伝播係数の積に $X_{k,l}$ を剰じた値に等しい。なぜなら $\varDelta_{i-1,l}$ が $\varDelta_{i,j}(l\leqq j)$ に及ぼす遅れは式 (3.5) によって与えられているので，ある $X_{k,l}$ によって $\varDelta_{k,l}$ が生じ，その $\varDelta_{k,l}$ によって次の停留所 $(k+1)$ に n 次の遅れ $\varDelta_{k+1,j}(j=l, l+1, \cdots, l+n-1)$ が生じ，それによってまた次の停留所 $(k+2)$ に n 次の遅れ $\varDelta_{k+2,j}$ が生ずるからである。そして結局 (k, l) から派生し (i, j) に集中するすべての影響を加えあわせたものが，$X_{k,l}$ が $\varDelta_{i,j}$ に及ぼす影響ということになる。ただし，$\varDelta_{i,j}$ への影響を考えているとき対象となり得る経路は $(i, j-1)$ を通る経路を除いたすべてである。このことは $\varDelta_{i,j}$ を到着時間遅れと定義していることから明らかである。いま $X_{k,l}$ が $\varDelta_{i,j}$ に及ぼす影響は，経路の伝播係数の積のすべての経路に関する和で計算されるので，これを $A_{ij}(k, l)\cdot X_{k,l}$ と書くことにする。$A_{ij}(k, l)$ は遅れの影響率である。実際には λ_i と a が確率変数であるから，この影響率は期待値でしかない。

次に，ある停留所からバスの終着点までの所要時間の変動，およびある停留所における待時間の変動について検討する。停留所 S から終点 N 迄の所要時間を Run(S, N) とする。各区間 k では走行時間が $N(\mu_k, \sigma_k{}^2)$ に従がうと仮定する。$X_{S+1,l}$ から $X_{N,l}(l\leqq j)$ までの各遅れによって生ずる S, N 間の走行時間の遅れは式 (3.6) で求められる。

$$\mathrm{Run}^1(S, N)=\sum_{k=S+1}^{N}\sum_{l\leqq j}A_{Nj}(k, l)\cdot X_{k,l}\cdots(3.6)$$

$\sum_{l\leqq j}$ は j より小さい l すべてについての和を意味するが，計算の結果，l が $j-4$ 以下の場合は影響が小さく無視することができる。次に $X_{1,l}$ から $X_{S,l}$ までの遅れによって生ずる S, N 間の走行時間遅れは式 (3.7) によって求められる。

$$\mathrm{Run}^2(S, N)=\sum_{k=1}^{S}\sum_{l\leqq j}\{A_{Nj}(k, l)\cdot X_{k,l}-A_{S,j}(k, l)\cdot X_{k,l}\}\cdots(3.7)$$

これは $X_{1,l}$ から $X_{S,l}$ までの遅れは停留所 S に引き起こす遅れと終点に引き起こす遅れの差として Run(S, N) に関係するからである。結局停留所 S から N までの走行時間は $\mathrm{Run}^1(S, N)$ と $\mathrm{Run}^2(S, N)$ と平均走行時間の和として求まる。$X_{k,l}$ が先に述べた正規分布に従い，おのおの独立とする。また乗客到着による各停留所での遅れは，平均 $a\lambda_i$ 分散 $a^2m\lambda_i$ のポアソン分布に従うと考えられる。m は平均運転間隔である。この遅れも $X_{k,l}$ と同様に伝播されると考えると，Run(S, N) の分散は式 (3.8) で与えられる。

$$\mathrm{Var}(\mathrm{Run}(S, N))=\sum_{k=1}^{S}\sum_{l\leqq j}\{A_{Nj}(k, t)-A_{Sj}(k, l)\}^2\cdot(\sigma_k{}^2+a^2m\lambda_{k-1})+\sum_{k=S+1}^{N}\sum_{l\leqq j}\cdot\{A_{Nj}(k, l)\}^2(\sigma_k{}^2+a^2m\lambda_{k-1})\cdots\cdots(3.8)$$

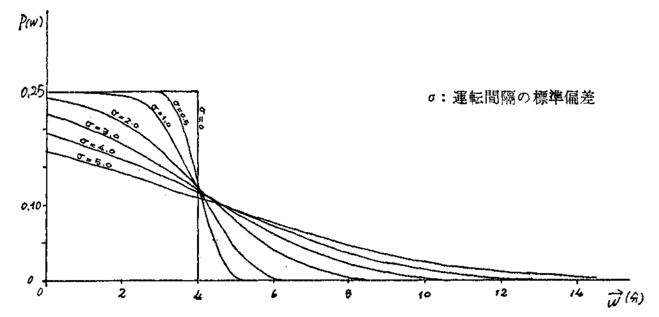
次にある停留所 i での待時間の変動について検討するため，まず i での運転間隔変動を求める。停留所 i でのバス j と $(j+1)$ の間隔を B_{ij} とすると，$X_{k,l}$ が B_{ij} に及ぼす影響は $(A_{ij}(k, l)-A_{i,j+1}(k, l))\cdot X_{k,l}$ となる。これは $X_{k,l}$ がバス j に及ぼす影響と $(j+1)$ に及ぼす影響の差である。乗客到着の変動も同様に B_{ij} に影響を及ぼすと考えると，結局 B_{ij} の分散は式 (3.9) となる。

$$\mathrm{Var}(B_{ij})=\sum_{k=1}^{i}\sum_{l\leqq j+1}\{A_{ij}(k, l)-A_{i,j+1}(k, l)\}^2\cdot(\sigma_k{}^2+a^2m\lambda_{k-1})\cdots\cdots(3.9)$$

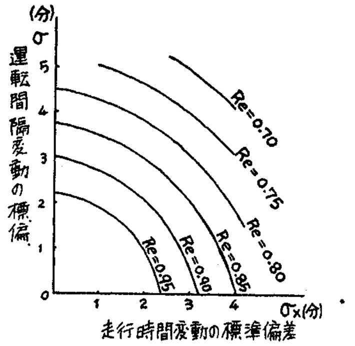
B_{ij} は多くの正規分布と指数分布の和であるから，中心極限定理により，平均 m，分散が式 (3.9) で与えられる正規分布で近似される。この分布で B_{ij} が負となる確率はバスがダンゴになる確率であると考える。このような運転間隔分布の下で，待ち時間分布を解析的に求めることは困難であるため，数値計算によることとした。すなわち，運転間隔の確率密度関数 $f(x)$ を式 (3.10) とする。

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma}\exp\left\{-\dfrac{1}{2\sigma^2}(x-m)^2\right\} & \cdots x>0\\ \displaystyle\int_{-\infty}^{0}\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma}\exp\left\{-\dfrac{1}{2\sigma^2}(x-m)^2\right\}dx & \cdots x=0\\ 0 & \cdots x<0\end{cases}\cdots\cdots(3.10)$$

ここで x は運転間隔であり，σ は式 (3.9) で計算される x の分散である。ある人が T 分だけ待ってバスに乗る確率は，時刻 t にある人が来る確率 $h(t)$ と，その T 分後にバスが来る確率との積の t についての和であり，したがって待ち時間の密度関数は式 (3.11) で与えられ



図—3　待ち時間分布（$m=4$ の場合）



図—4　信頼度平面（4分間隔運転，$Z=6$ 分）

る。

$$W(T)=\int_0^\infty h(t)\cdot f(t+T)\,dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3.11)$$

T の各値について数値計算を行い $W(T)$ を求めた。$h(t)$ についてはバスがダンゴになる場合を除いた見かけ上の運転間隔の逆数と仮定した。平均運転間隔 m が4分の場合について計算した例が図—3である。ここで σ は式(3.9)から求める標準偏差である。

以上の定式化において，主として各停留所で乗客を乗せ，終点停留所で乗客を降ろす，鉄道のアクセス・バス路線を想定したため，降車客についての定式化は行っていない。また乗車時料金徴収方式のバスの場合は特に乗車時間に比して，1人当り降車必要時間は短かく，そのバスの遅れに及ぼす影響も小さいといえる。

（2）　バスの信頼性

バス輸送は現在多くの問題点を有しているが，運行上の問題点としては，表定速度の低下と信頼性の劣化があげられる。表定速度の向上策として優先・専用レーンや感応式信号機の設置，乗降時間を減少させるバス構造の改善などが考えられており，それら対策の評価も比較的容易であるといえる。しかしバスの不規則運行すなわち信頼性の問題も表定速度の問題と同時にきわめて重要であり，上記各対策は信頼性向上に対する効果も大きいと考えられる。ここに視点を置いた分析をおこなうため，まず信頼性を次のように定義する。

$$R_e=P_r(X+W\leq Z)$$

ここで R_e はバスの信頼度であり，X は走行時間の実現値と期待値の差，W は停留所での旅客の待ち時間である。Z は旅客がバストリップに対し見込む余裕時間であり，P_r は $(X+W)\leq Z$ となる確率である。

すなわち，見込み余裕時間内で目的地に到着できる確率をもってバスの信頼度と定義する。もちろん，見込み余裕時間は，バスの信頼性により人々が設定するものと考えられるが，ここでは望ましい値，または目標水準の一種としてとらえている。

R_e は，定義により X および W の分布形および Z により定まるが，各路線ごとにこれらの説明変数は異なり，またその計算が繁雑であるため，W の平均値と分散，X の分散（平均値は0），Z を多数設定し，これらの値が既知のときそれから R_e を求める，一般化したグラフをあらかじめ作成した。このグラフにより各路線，各停留所の R_e を求めることができる。その一例を示すと，図—4のとおりである。このような図を信頼度平面とよぶこととする。

さて，バス利用者にとって，同一路線であっても信頼度は同じではない。各停留所からバスの終着地までのトリップを考えると，始発地からの利用者に対しては待ち時間の分散が小さく，走行時間の分散は大きい。終着地近くの停留所からの利用者に対してはこの逆のことがいえる。したがって，ある路線を先に求めた信頼度平面にプロットすると右下りの曲線となり，右下が始発地，左上が終着地近くの停留所となる。もちろん，利用者はすべて終着地まで行くのではなく，上記曲線は各停留所についての信頼度の最小値となっている。

（3）　バス運行改善策の評価方法

本節では，現存路線を例として，先に（1），（2）で示した理論を用いて，優先レーン，優先信号，バスの改良（2人同時乗車可能）の3つの対策に関し信頼度の向上を計算する方法を示すこととする。

対象とした路線は，東京都営王40系統（西新井駅—池袋駅間）であり，その概要は表—1に示すとおりである。

3種の対策は次のようにして計算式に導入した。

1）　優先レーン；この実施は，走行時間変動を減少させるものである。走行時間変動には，交通量に起因する部分と，（1）で示したバスの運行挙動に起因する部分とが存在する。交通量に起因する部分を示す一例として，都営バス運行日試より曜日と時間による所要時分の変動のデータを用いることとした。このデータよりラッシュ1時間の平均所要時分を曜日ごとに求め，この曜日変動相当分を専用レーン導入により解消できると仮定し

表—1 都営王 40 系統の概要

停留所名	平均到着率 (人/分)	距離 (m)	平均所要時間 (秒)	所要時間の標準偏差 (秒)
1 西新井駅	6.56			
		550	79	11.1
2 西新井警察	0.578			
		270	49	12.5
3 栗原町	0.765			
		330	59	12.7
4 西新井大師	1.737			
		750	130	38.4
5 阿弥陀橋	1.212			
		400	72	19.7
6 江北4丁目	1.114			
		350	63	17.7
7 江北1丁目	1.292			
		400	72	9.5
8 荒川土手操車場	1.637			
		160	33	9.8
9 荒川土手	1.317			
		1 210	132	18.6
10 宮城町	1.071			
		340	61	9.0
11 豊島5丁目団地	0.778			
		490	80	23.6
12 豊島4丁目	1.857			
		370	67	15.5
13 豊島3丁目	0.936			
		330	59	14.4
14 豊島2丁目	0.002			
		570	102	21.6
15 王子駅	1.300			
		620	110	31.6
16 飛鳥山	0.424			
		380	68	9.0
17 滝ノ川2丁目	0.460			
		290	52	10.8
18 滝ノ川車庫	0.441			
		390	70	14.8
19 西巣鴨	0.818			
		270	48	7.0
20 堀割	0.658			
		440	79	16.5
21 上池袋3丁目	0.628			
		350	63	11.2
22 上池袋1丁目	0.514			
		630	113	24.0
23 豊島区役所	0.001			
		310	56	11.5
24 池袋駅東口	0			

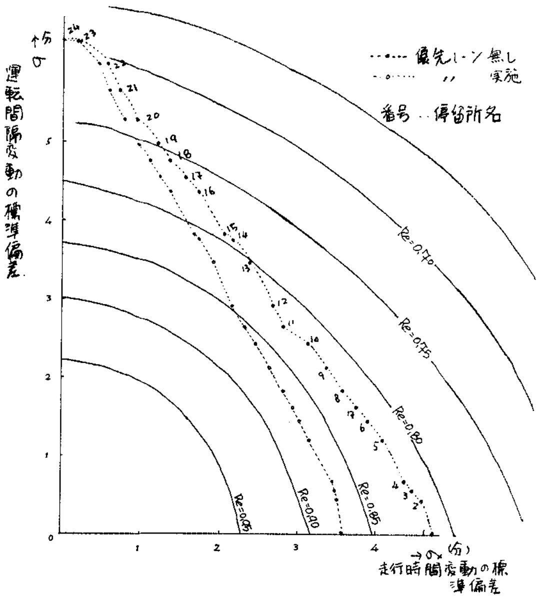
た。すなわち，運行挙動に起因する変動は平均所要時分を用いることにより除去できているというきわめて乱暴な仮定を設定している。

2) 優先信号；この実施も，走行時間変動を減少させるものであるが，優先レーンと異なり，信号機にのみ起因する変動の減少である。これに関しては，交差点を含む区間と含まない区間，それぞれについての区間走行時間変動の差が優先信号の効果として適用できると仮定した。

3) バスの改良；2人同時に乗降できるバスを導入することにより，平均乗降時間 a が半減できると仮定した。

以上，各政策に対するここでの扱いについては，大きな仮定を設定している。その意味でこの計算例は評価方法を例示するに過ぎず，評価結果を論ずるには上記各データを正確に測定することが必要である。

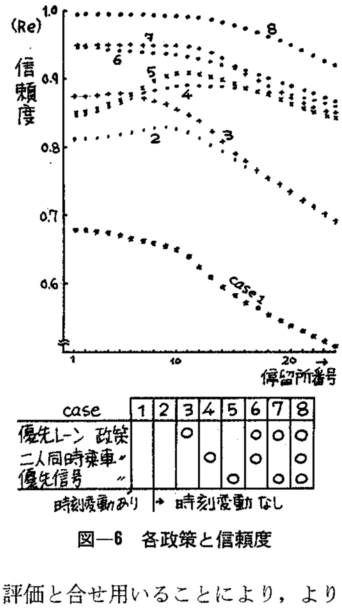
各政策に対応して，各パラメーターを変化させることにより，X および W の変動を求めることができ，これを信頼度平面にプロットすることにより信頼度が得られ



図—5 バス優先レーンによる信頼度向上

る。一例を示すと図—5 のとおりである。

さらに各種対策を相互比較するには図—6 が便利である。この図において各曲線は，ある対策を実施した場合の各停留所の最小信頼度を示している。



図—6 各政策と信頼度

以上が，信頼度に着目したバス運行改善策の評価方法であり，従来研究がなされてきた表定速度向上効果の評価と合せ用いることにより，より現実的評価が可能となろう。

4. バス路線再編のための一考察

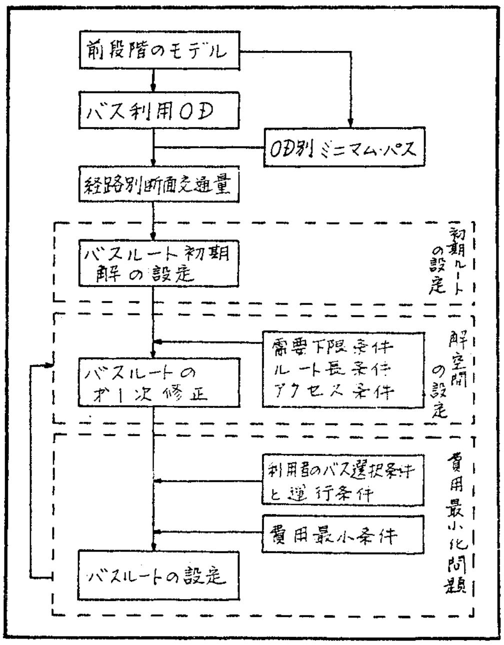
(1) バス路線再編の考え方

バスは公共輸送機関の中で，端末交通を受けもつ交通機関であり，近距離トリップ，アクセストリップを主たる対象とする。また軌道交通システムに比し，容量は小さく，路線の自由度も高いため，公共交通ネットワーク

におけるシビルミニマム的役割を担っている路線も多い。このような意味でバス路線再編問題は，地域住民に対し，大きな，そして多様な影響を有している。換言すれば，バス路線再編は，その地域の条件，住民の意見を十分考慮してなされる必要があるといえよう。しかし，より扱い易いと考えられるマクロな視点からのアプローチすら，十分なされているとはいいがたい段階にあることは，**2**．で述べたとおりである。そこで本論文では，まず第1段階として，図―**7** の範囲に限定して都市内バス路線網設定問題を扱うこととした。

まず，この方法を適用する前段階として土地利用モデル，軌道交通ネットワーク決定モデル，道路網決定モデルなどを想定し，これらのアウトプットとしてバス利用 OD 交通量が与えられていると仮定する。また利用者の立場からの評価は，需要下限条件，ルート長条件，アクセス条件という3つの制約条件の設定時にのみ考慮し，この部分以外は対象地域全体でのバス費用最小問題とする。

ここで需要下限条件とは，バス路線の設定のための最小需要量であり，設定された路線がこれを満たさない場合は原則として排除し，再計算をおこなう。ルート長条件とは，1本のバス路線長の上限と下限を意味する。これは，バス運行上定まるものである。アクセス条件とはターミナル施設やバス回転場，営業所などによる路線始終点の制約である。バス路線の初期解として，すべての OD ペア間に路線を設定し，まず，3条件を満たさない路線を排除する。



図―**7** バス路線設定の手順

残った路線の中には，他の路線の1部として含まれているものが数多く存在し，これらの路線の他路線への吸収，および各路線の運行回数の設定は，次節で示す方法による。

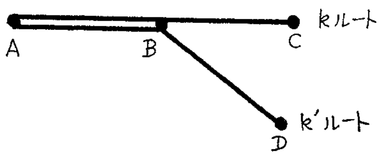
(2) 費用最小化問題の定式化

交通ネットワークの最適化問題として，鉄道ネットワークや道路ネットワークに関する方法はいくつか提案されている。これらに共通するのは，交通ネットワークをリンクとノードの集合として簡略化している点である。すなわち，これらは，インシデンス・マトリックスと，そこに含まれるリンクの容量の最適化にほかならない。

一方，バス路線は，1本のリンクに複数の路線系統が設定される場合が多く，上記考え方は適用できない。換言すれば，経路の組合せ最適化問題であり，道路，鉄道の場合より次数が高く，複雑であるといえよう。

さらに問題を複雑にしているのは，利用者のバス選択条件である。いま，あるバス停留所で待っている利用者がおり，この利用者の目的地を経由する系統が複数あったとする。このような場合利用者は，特別な理由がない限り，最初に来たバスに乗り込むであろう。このことは，バスの運行回数に比例する確率で，各系統が利用されることを意味する。しかし，運行回数はこの問題の未知数であり，したがって，この確率を設定することはできない。

従来の交通ネットワーク最適化問題とこの2点で異なるバス路線最適化問題は，インシデンス・マトリックス，パス・マトリックスに追加して，2，3のマトリックスを定義することにより，簡単なグラフ理論の問題として定式化できる。以下にその方法を示す。



図―**8** バス系統の例

いま，図―**8** の2系統を考える。上記利用者行動を前提としたとき，バスの運行回数は，これら利用者を含む全利用者数に対応していなければならない。すなわち，バス系統 k は，$\overline{AC}$ 間利用者と $\overline{AB}$ 間利用者のうち k 系統利用者との合計に対応する運行回数を持たねばならない。この条件は次のように表わされる。

$$x_k \geq \frac{1}{C}\left(V_{AC}+\frac{x_k}{x_{k'}+x_k}V_{AB}\right)$$
$$=\frac{1}{C}(V_{AC}+{}_kP_{AB}V_{AB}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.1)$$

ただし，　V_{AB}：AB 間の OD 交通量

x_k：k 系統のバス運行回数

C：バス1台当りの定員

${}_kP_{AB}$：V_{AB} のうち k 系統を利用する割合

以後一般化して，V_{AB} は V_i と，${}_kP_{AB}$ は ${}_kP_i$ と，${}_kV_{AB}$ は ${}_kV_i$ と表わし，${}_kV_i={}_kP_iV_i$ と定義しておく。

一般に ${}_kP_i$ は，(k 系統の運行回数)/(i OD ペアの利用者が乗りうるすべての系統の運行回数の和) であり，式 (4.2) で表わせる。

$$
\begin{aligned}
{}_kP_i &= x_k/\sum_j r_{ij}x_j \\
&= x_k/y_i \qquad (4.2)
\end{aligned}
$$

ここで，r_{ij} はドミネイト・マトリックスと名づけ，

$$r_{ij}=\begin{cases}1：i \text{ 系統が } j \text{ 系統に包含されるとき}\\ 0：\text{その他のとき}\end{cases}$$

y_i：i OD ペアの利用者が利用可能な系統の合計運行回数

y_i および ${}_kV_i$ は次のように表わされる。

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{RX} \qquad (4.3)$$

$$\boldsymbol{V}^*=\boldsymbol{PV} \qquad (4.4)$$

ここで

$$\boldsymbol{y}=\begin{bmatrix} y_1\\ \vdots\\ y_N\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1N}\\ \vdots & r_{ij} & \vdots\\ r_{N1} & \cdots & r_{NN}\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_1\\ \vdots\\ x_N\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{V}^*=\begin{bmatrix} {}_1V_1 & \cdots & {}_1V_N\\ \vdots & {}_kV_i & \vdots\\ {}_NV_1 & \cdots & {}_NV_N\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} V_1 & \cdots & 0\\ \vdots & V_i & \vdots\\ 0 & \cdots & V_N\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} {}_1P_1 & \cdots & {}_1P_N\\ \vdots & {}_kP_i & \vdots\\ {}_NP_1 & \cdots & {}_NP_N\end{bmatrix}$$

次に第 k ルートのリンク q に乗る利用者数 ${}_kT_q$ を求める。この ${}_kT_q$ により式 (4.1) は次のように一般化できる。

$$x_k \geqq \frac{1}{C}\times\max_q({}_kT_q) \qquad (4.5)$$

いま図—9 に示す ${}_kT_q$ は次式により求められる。

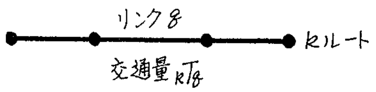
$${}_kT_q=\sum_i {}_kS_{iq}\cdot{}_kV_i$$

すなわち

$${}_k\boldsymbol{T}={}_k\boldsymbol{V}\cdot{}_k\boldsymbol{S} \qquad (4.6)$$

ただし，${}_k\boldsymbol{S}$ は制約条件マトリックスとよぶこととし

$${}_kS_{iq}=\begin{cases}1：i \text{ OD ペアの利用者が } k \text{ 系統 } q \text{ リンクに乗るとき}\\ 0：\text{その他のとき}\end{cases}$$



図—9　交通量 ${}_kT_q$

$${}_k\boldsymbol{T}=({}_kT_1,\ {}_kT_2,\ \cdots,\ {}_kT_M),$$

${}_k\boldsymbol{V}=({}_kV_1,\ {}_kV_2,\ \cdots,\ {}_kV_N)$：$\boldsymbol{V}^*$ の第 k 行ベクトル

$${}_k\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} {}_kS_{11} & \cdots & {}_kS_{1M}\\ \vdots & & \vdots\\ {}_kS_{N1} & \cdots & {}_kS_{NM}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} {}_1\boldsymbol{T}\\ \vdots\\ {}_N\boldsymbol{T}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} {}_1T_1 & \cdots & {}_1T_M\\ \vdots & & \vdots\\ {}_NT_1 & \cdots & {}_NT_M\end{bmatrix}$$

一方，式 (4.5) は式 (4.7) のように表わされる。

$$\boldsymbol{X}^* \geqq \boldsymbol{CT} \qquad (4.7)$$

ただし，$\boldsymbol{X}^*$ は N 行 M 列のマトリックスであり，

$$\boldsymbol{X}^*=\begin{bmatrix} x_1,\ x_1,\ \cdots,\ x_1\\ \vdots\\ x_N,\ x_N,\ \cdots,\ x_N\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} 1/C & \cdots & 0\\ \vdots & 1/C & \vdots\\ 0 & \cdots & 1/C\end{bmatrix}$$

一方，初期解としてミニマムパスを設定しておけば時間コスト最小条件はおよそ満足されており，バス輸送コストは総走行キロ Z に比例すると仮定し，次の目的関数が設定される。

$$Z=\boldsymbol{DX}\rightarrow \min \qquad (4.8)$$

ただし

$$\boldsymbol{D}=[d_1,\ d_2,\ \cdots,\ d_N]$$

d_k：k 系統の距離

以上により，バス路線の費用最小化問題は，式 (4.2)，(4.3)，(4.4)，(4.6)，(4.7) を制約条件とし，式 (4.8) を目的関数とする問題として定式化された。

ここで定義したドミネイトマトリックス $\boldsymbol{R}$，制約条件マトリックス ${}_k\boldsymbol{S}$ は次のようにきわめて簡単に求めることができる。まず，$\boldsymbol{R}$ については，パス・マトリックス $\boldsymbol{L}$ を用いて，次のような E_{ij}，F_{ij} を計算する。

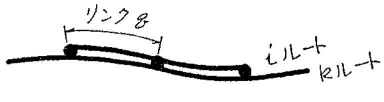
$$\left.\begin{aligned} E_{ij}&=\sum_q^M (l_{jq}-l_{iq})\\ F_{ij}&=\sum_q^M |l_{jq}-l_{iq}|\end{aligned}\right\} \qquad (4.9)$$

$$l_{iq}=\begin{cases}1：i \text{ 系統（パス } i\text{）がリンク } q \text{ を通るとき}\\ 0：\text{その他のとき}\end{cases}$$

パス・マトリックスは，インシデンス・マトリックスと距離ベクトルから簡単に計算される。この E_{ij} と F_{ij} により r_{ij} が次のように求められることは，定義より明らかである。

$$r_{ij}=\left\{\begin{aligned}&1：E_{ij}=F_{ij} \text{ のとき}\\ &0：E_{ij}\neq F_{ij} \text{ のとき}\end{aligned}\right\} \qquad (4.10)$$

次に制約条件マトリックス ${}_k\boldsymbol{S}$ は，図—10 より明ら



$$\left.\begin{aligned} r_{ik}&=1\\ l_{iq}&=1\end{aligned}\right)\Leftrightarrow {}_kS_{iq}=1$$

図—10　制約式マトリックスの決定

かなように，${}_kS_{iq}=1$ となるのは，i 系統が k 系統に包含され，かつ，i 系統が q リンクを含むときであり，逆も成り立つことから次式が成立する。

$${}_kS_{iq}=r_{ik}l_{iq} \quad \cdots\cdots(4.11)$$

(3) 適用上の問題点

以上述べたように，バスルート設定問題をきわめて簡単化し，その定式化を試みたが，その適用には，大別して２種の大きな問題が残されている。第１は問題の単純化に起因するものであり，第２は制約式の非線形性による計算技術上の問題である。したがって現段階では，ほとんどのゾーンペアに直通バスルートが設定できる場合，すなわち，粗いゾーニングでの広域バス路線網の体系設定のような場合にのみ適用可能であるに過ぎない。個々のバス路線設定には，より詳細な制約条件および評価要因の導入と，計算効率の向上が必要不可欠といえよう。

5. 結　論

本論文では，バス輸送のゆきづまりに着目し，その改善の方向を運行改善と路線再編という２面からとらえた。そして，これら２点についての基礎となる方法論的検討をおこなったものである。

運行改善については，バスサービスの指標としてバスの信頼度を定義し，バス運行挙動の定式化と組み合わせることを試みた。それにより，バス優先レーン，優先信号，バス車両の改善という３大対策を，信頼度という側面から比較評価する方法を提案している。従来これら対策は，表定速度向上という視点からのみ評価されすぎた傾向にあり，そのため，車両改善などは十分進められていない。本試算によれば，信頼性改善という意味で，この対策は他とならび重要なものとして位置づけられている。より精度の高いデータを用いることにより，運行改善策の新しい評価が可能となろう。

バス路線再編に関しては，問題を単純化し，第一段階の定式化をおこなった。従来の交通ネットワーク決定問題は道路や鉄道を対象としており，リンク容量の最適化として定式化されている。バスの場合，１リンクに複数バス系統が設定されるため，リンク集合についての容量最適化として定式化する必要がある。本論文では，従来グラフ理論に用いられている行列に追加して，いくつかの行列を定義することにより，きわめて単純にこの問題が定式化できることを示した。この方法は，バス路線再編方法論の第１段階というべきものであり，今後実用可能な方法論に完成すべく検討を続けたい。

なお，本研究に当り，前東京工業大学教授　菅原　操先生にご指導頂いたことを記し，感謝の意を表します。

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) 高岸節夫・戸松　稔：バス運行挙動に関する二，三の考察，土木学会論文報告集，No. 199, 1972.
3) 増田典行：バス優先車線の効果に関する一つの考察，土木学会第 27 回講演概要集 IV, 1972.
4) 天野光三・銭谷善信：バスレーンの設置効果に関する考察，同上第 28 回，1973.
5) 警察庁：路線バス等の優先通行帯および専用通行帯の設定とその効果の調査研究，1973.
6) 東京バス協会：都内バス輸送の現状とその対策 (1), (2), 1971，など.
7) Lampkin, W. and Saalmans, P.D. : The Design of Routes, Service Frequencies and Schedules for a Municipal Bus Undertaking, A Case Study, Operational Research Quarterly, Vol. 18, No. 4, 1967.
8) Rapp, M.H. : Interactive Editing of Transportation Networks, Research Report No. 4, Urban Transportation Program, Department of Urban Planning and Civil Engineering, University of Washington, 1970 など.
9) Rapp, M.H. : Man-Machine Interactive Transit System Planning, Socio-Econ. Plan. Sci. Vol. 6, 1972.
10) 飯田恭敬・吉田豊穂：大量輸送機関の運転路線系統および配車の決定について，土木学会第 28 回講演概要集，1973.

(1974.10.21・受付)