土木学会論文報告集
第 325 号・1982 年 9 月
【論　　文】

都市街路網におけるバス系統の設定計画モデルに関する研究

A STUDY ON BUS ROUTE PLANNING MODEL FOR URBAN ROAD NETWORK

天野光三*・銭谷善信**・近東信明***
By Kozo AMANO, Yoshinobu ZENITANI and Nobuaki KONTO

1. はじめに

都市郊外の市街化と人口の郊外分散に伴う OD トリップパターンの変化や地下鉄新設路線へのバスからの乗客の転嫁に対応して，バス路線は当然再編成が必要となる．バスは鉄道に比較して運行系統や運行回数を需要に応じて容易に変更できるが，バス系統は従来，バス事業経営者の勘と経験によって設定されており，必ずしも合理的に行われているといいがたい．

好ましいバス系統網として必要な条件は，なるべく乗り換えの不要な，直通系統があることが考えられる．しかしそのためには必然的に系統数が多くなる結果，1 系統当たりの運行回数が少なくなり，利用者のバス待ち時間が長くなるほか，バス系統が複雑でかわりにくくなる欠点がある．要するにバス系統計画の目的は，上記の排反する要素を勘案し，乗り換えを必要とする利用者を少なくしつつ，同時になるべく系統数を少なくして，バスの運行頻度と運行効率を高めることにあるといえる．すなわち，利用者と経営者の双方にとって望ましいバス系統網を合理的に設定する手法の開発が必要であり，本稿ではこれらの点に着目し，バス系統の設定計画モデルを提案する．

2. バス系統計画に関する従来の研究と本研究の特徴

(1) 従来の研究

従来から好ましいバス系統網の設定を目的とした多くの研究がある[1)~5)]．

森地・岩井・鈴木[1)]は，与えられたバス系統網・道路網のもとで，バスの各系統に必要な最小需要，バス系統長の上限・下限，アクセス条件を制約条件として，バスの総走行費用が最小になる運行回数を設定する手法を提示している．

飯田・吉田・中村[2)]は，数種類の系統網代替案を与件とし，全 OD が輸送できるように，配車台数が最小になる各系統の運行回数を求め，各代替案の比較を行っている．

奥谷・牧野[3)]は，系統網を与件とし，配車台数の上限を制約条件に，乗客の総旅行時間が最小になる各系統の運行回数を求める手法を用いている．

森地・鈴木[4)]は，奥谷ほかと同じ制約条件であるが，運行回数の設定において，各系統の運行回数を 1 本増加したときの評価関数の減少量が多い系統の運行回数をまず設定し，繰り返しにより各系統の運行回数を求める手法を示している．

以上の 4 つのモデルはいずれもバス系統を与件としているが，枝村・森津・松田ら[5)]は，総乗車時間が最小になる系統網を整数計画法により内生的に求め，その系統案について乗り換えを含む待ち時間が最小になる各系統の運行回数を求める手法を示している．

以上の研究の特徴を **表—1** に示す．これらの研究は，森地・鈴木の研究[4)]を除き，いずれも目的関数を設定し，これを最適にする数理計画手法を用いているが，制約条件が非線形である場合は近似解法を用いる必要があり，大街路網での計算がきわめて困難と考えられる．次にこれらの研究のうち，乗客の乗り換えを考慮しているのは枝村ほかの研究[5)]と奥谷ほかの研究[3)]のみであるが，この 2 つの研究はあらかじめ定められた地点あるいは乗車経路を通過して乗り換えるようになっており，そのため運行回数が変わっても乗り換え地点は固定されている．

* 正会員　工博　京都大学教授　工学部交通土木工学科
** 正会員　工博　摂南大学講師　工学部土木工学科
*** 正会員　工修　南海電鉄（株）

表—1 バス系統計画モデルの特徴比較

モデル	バス系統の与え方	制約条件	目的関数	複数系統の利用
森地・岩井・鈴木[1]	外生的	ルート設定の必要最小需要 系統長の上・下限 路線始終点（アクセス）の制約	バス費用最小 （総走行キロ最小）	直通系統についてのみ考慮する （同一区間内での複数系統の利用）
飯田・吉田・中村[2]	外生的 （数種類の代替案）	全ODが輸送できること	配車台数最小	考慮しない
奥谷・牧野[3]	外生的	バスの配車台数の上限 乗客数が定員以下	乗客の総旅行時間最小 （待ち時間含む）	考慮しない
森地・鈴木[4]	外生的	投入台数一定 （経費一定）	目的関数はない （評価関数として総旅行時間を用いる）	考慮しない
枝村・森津・松田・土井[5]	内生的 （総乗車時間が最小になる系統網）	系統数 系統長 バス台数 乗客数が定員以下 乗り換え回数 （全ODの個別の最大回数）	総所要時間最小 （乗り換えを含む総待ち時間最小）	直通系統についてのみ考慮する
本研究のモデル	内生的 （全乗客が目的地まで乗り換えずに直通できるように設定）	系統長 系統の型 （右左折4回以内，長方形または正方形） 乗り換え回数 （個別の最大乗り換え回数，全体に対する1回，2回乗り換え乗客数の割合） 乗客数は定員以下	待ち時間，乗り換え乗客数，総走行距離，などの各種の評価指標を求めるシミュレーションモデルであって，目的関数はない．	考慮する （直通・乗り換えいずれについて，複数の経路を考慮する．）

しかし現実には同一の道路区間に複数のバス系統が存在するので，各系統に対する利用者の選択を考える必要がある．森地らの研究[1]は，乗り換えのない直通系統についてのみ利用者の選択が考慮されている．また，枝村らの研究[5]では，乗り換えの場合にもこれを考慮しているが，乗り換え回数が最も少なくかつ最短所要時間の経路で，最初に乗った系統にできるだけ長く乗ったうえで乗り換えるものと仮定されている．このとき乗車経路と乗り換え停留所は固定されるので，h で乗り換える ij 間のトリップは ih 間と hj 間のトリップに分けられ，すべて乗り換えを必要としないトリップに置き換えられる．そのため定式化では乗り換えを考慮する必要がないので，実際上は直通系統のみについて利用者の選択を考慮していることになる．

（2） 本研究の特徴

本研究では，OD 交通需要に対応するバス運行頻度を設定することはもちろんであるが，目的地に至るバス系統や経路が複数個ある場合に，直通・乗り換えのいずれの場合についても利用者によるバス系統の選択が行われることを考慮する．

本研究で提案するモデルは，与えられた道路網とバス利用者 OD 表のもとで，考え得るすべての候補系統をまず探索し，そのうちから全乗客が目的地まで直通で行ける有限個の候補系統を設定する．次に各系統の輸送人数を示す系統指標を用いて運行効率の小さい系統を順次削除して系統数を限定したうえで，グラフ理論を利用して乗り換え乗客数や各系統の運行頻度，総走行距離，乗客の待ち時間などの評価指標を算出するバス系統の設定計画のシミュレーションモデルである．

なお評価指標としては，乗客の総所要時間も重要であるが，本研究の場合，最短時間経路で乗車するので，バスの総走行距離の指標で代用できると考えられる．

本モデルは候補系統設定[6]，系統数限定，運行頻度設定の3つのサブモデルからなる．このうち第2，第3の2つのサブモデルは，目的地まで乗り換えなしで利用できるバス系統を示す直通系統行列を用いるので，グラフ理論を応用して乗り換え回数別乗客数を容易に計算できる特徴をもつ．これによって任意の乗り換え回数の上限を考慮したバス系統の運行頻度の設定が可能となった．なお本モデルの特徴を 表—1 の最下欄に示す．従来の研究では不十分，または課題として残された点を改良し，本モデルは次に述べる特徴をもつ．

① 大街路網で全 OD が乗り換えなしで目的地に直通できる一定数の系統を内生的に設定できる．

② 乗り換え時における利用者のバス系統の選択が考慮されている．このとき乗り換え地点で利用できる複数の系統の運行頻度が変われば，乗り換え地点も変動する．

③ 直通系統行列を用いて乗り換え回数別乗客数を算出し，任意の乗り換え回数の上限を考慮した運行頻度の設定を可能とした．

（3） 本モデルの前提条件

本モデルではバスが公共交通体系の中心的役割を果たしている都市の道路網を対象とし，次に述べる前提条件を設ける．

① 系統網設定の対象とする輸送機関はバス1モード

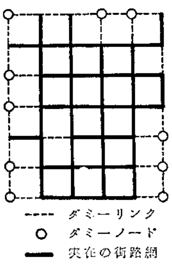
乗客の乗り換え	出力	備考
考慮しない	運行回数	制約条件は非線形，各ゾーンペアに対し直通ルートが設定できる場合のみ適用可能
考慮しない	運行回数	
考慮する（あらかじめ定められた地点で乗り換える.）	運行回数	乗り換えを認める，認めない場合で，別々に定式化.
考慮しない	運行回数	限界費用を考え，運行回数を繰り返しにより設定.
考慮する（乗り換え回数が最も少なく，かつ最短所要時間の経路を選ぶため，あらかじめ定められた経路を通るので運行回数の影響を受けない.）	運行回数	各ODについて，最大乗りかえ回数を越えるトリップには利用する経路がない.
考慮する（任意の地点で乗り換えるが，乗り換え地点は運行回数が変われば変動する.）	運行回数 乗客の待ち時間 バスの総走行距離 乗り換え回数別の乗客数 系統別区間乗客数	

とする.

② 1個または隣接する複数個のバス停留所の集合を1個のノードとし，乗客はノードで発生しまた吸収される.

③ バス利用者のOD交通需要は時間によって変化せず，またいかなるバス系統網を設定しても変化しないものとする．本来利用者のOD需要は朝の通勤時間帯，昼間，夕方で目的や性格がそれぞれ異なるが，本モデルではこの時間帯をたとえば朝の通勤時間帯のみに限定し，この時間内ではOD交通需要は変化しないものとする.

④ 道路網は実際に存在しないリンク，ノードを含めて格子状街路網を構成しているものとし，図—1に示すようにダミーリンク，ダミーノードを用いることにより，都市近郊へ延長された系統をも考慮することができる．このダミーリンクを含む街路網を拡大街路網とよぶこととする.



図—1 道路網とダミーノード，ダミーリンク

なお格子状道路網でない一般の街路網では，ダミーリンク，ダミーノードを用いて街路網を格子状に変更することにより，一般の街路網にも拡張可能と考えられる.

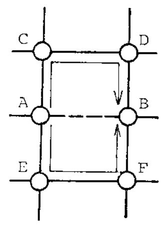
⑤ バス利用者は，目的地までの最短経路を通るバス系統を選択利用する．なお道路網の任意のリンクが欠けている場合，図—2に示すAからBへ行くには，A—Bは通ることができず，A—C—D—B，またはA—E—F—Bを経由することとする.

表—2 本モデルで用いる用語の定義

用語	定義
ノード	1個または複数個のバス停留所の集合
リンク（区間）	隣接する2つのノード間の道路区間
ダミーリンク	実在しない架空のリンク（図—1 参照）
ダミーノード	実在しない架空のノード（図—1 参照）
路線	バスが走行する区間の集合
系統	バスが走行する一定の連続した区間の集合
バスターミナル	バスの起点または終点となるノードであり，単にターミナルという.
ODペア	任意の起点・終点の組合せ
OD交通量	ODペアに対応する乗客数
候補系統	候補系統設定サブモデルで設定される系統
直通系統	任意のODペアの乗客が乗り換えずに目的地まで直通利用できるバスの系統
系統指標	バス系統の単位リンク長当たりの乗客輸送人数
運行頻度	バス系統の1時間当たりの運行回数

以下本研究で用いる用語を 表—2 のように定義する.

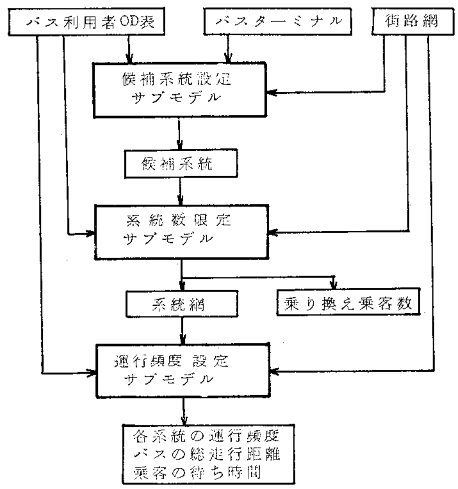
本稿では（4）で本モデルの全体構成を概説し，モデルを構成する3つのサブモデルをそれぞれ 3.,4.,5. に述べる.



図—2 AB 間の経路

（4） 本モデルの構成

バス系統の設定計画の全体モデルは，図—3に示す候補系統設定，系統数限定，運行頻度設定の3つのサブモデルからなる．本モデルはバス利用者OD表，街路網，バスターミナルの配置を与件とし，候補系統設定サブモデルによってまず全乗客が乗り換えずに目的地まで行ける有限個の候補系統を設定する．次にこの候補系統を系統数限定サブモデルに入力し，系統指標を用いて運行効率の小さい系統から順次削除し，系統数を限定する．運行頻度設定サブモデルでは，この限定された系統を入力して，各系統の運行頻度，バスの総



図—3 モデルのフローチャート

走行距離，乗客の待ち時間などを算出して出力する．

3. 候補系統設定サブモデル

本サブモデルは都市街路網，バス利用者 OD 交通量，バスターミナルの配置を与件とし，全体モデルのまず第1段階として，全乗客が乗り換えなしで目的地へ行けるために必要な候補系統を探索する．その場合，利用する乗客の需要の多い系統から優先して候補系統として設定することとする．なお本サブモデルの定式化はすでに詳述されている[6]ので，以下その要点のみを述べる．

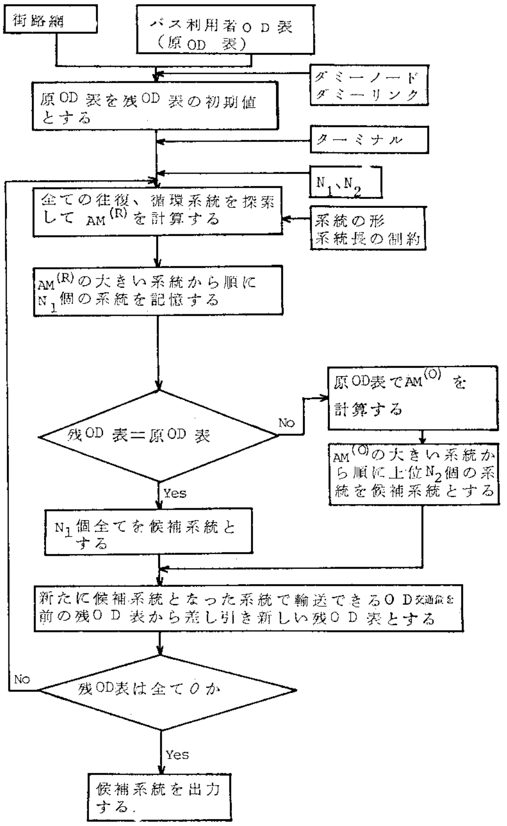
本サブモデルでは，ある系統が単独に存在する仮想的状態において，その系統だけで目的地まで乗り換えずに直通できる OD ペアの乗客数を合計し，系統長で除した値を系統の潜在的輸送需要と名付け，これを系統設定の指標として用いる．

系統の運行経路長が長くなれば運行が不正確になり，短すぎれば折り返し点での損失時間が生じるなど，運行効率が悪くなる．そこで系統長の制約を設け，あらかじめ定められたバスターミナルを経路上の一点あるいは起・終点にもつ，考え得るすべての系統を探索し，全乗客が目的地へ直通できるように潜在的輸送需要の多い上位から順に系統を設定する．なお系統の形はあまり複雑なものは実際的でないので，右左折回数は4回以内とする．

ところで都市街路網が大きくなるにつれて，考え得る候補系統の数は急激に多くなり，この膨大な候補系統の記憶や，潜在的輸送需要の多い系統の順への並びかえが電子計算機の記憶容量上の制約から不可能になることがある．またこの候補系統を入力する系統数限定サブモデルの計算時間は候補系統数に大きく支配されるので，考え得るすべての系統を候補系統にすることは実用上問題がある．

この点を考慮して，膨大な系統の中からある一定数の系統を選ぶために，以下に述べる第1セレクタ N_1，第2セレクタ N_2 という系統数設定指標を導入する．これによって全 OD が乗り換えなしで目的地へ直通できる必要かつ十分な有限個の候補系統を設定することを考える．

図—4 に候補系統設定サブモデルのフローチャートを示す．図中，残 OD 表とは，その時点までに設定された候補系統では目的地へ直通できない OD 乗客数を示す数であり，$AM^{(R)}$，$AM^{(O)}$ は残 OD 表および原 OD 表のもとで，直通で結び得る OD 交通量の合計，すなわち潜在的輸送需要を示す．モデルではまず原 OD 表のもとで $AM^{(R)}$ の大きい系統から順に N_1 個の系統をとり，これによって目的地まで直通できる OD 交通量を残 OD 表から差し引き，これを次のステップでの残 OD 表とする．



図—4 候補系統設定サブモデルのフローチャート

図—4 に示すように，さらにこの OD 表のもとで $AM^{(R)}$ の上位 N_1 個を記憶し，この N_1 個の中で，原 OD 表のもとで $AM^{(O)}$ の大きい上位 N_2 個を候補系統に設定する．さらにこの N_2 個の系統で直通できる OD 交通量を残 OD 表から差し引き新しい残 OD 表とする．この残 OD 表が0であれば全乗客は乗り換えなしで輸送できることになるが，そうでなければまだ乗り換えを必要とする乗客がいるので，$AM^{(R)}$ を求めるステップに戻り，さらに新たな N_2 個の候補系統の追加設定を繰り返す．

大街路網では全 OD を直通で目的地まで輸送するために何本の候補系統が必要か，予想が困難であるが，第1セレクタ N_1 はまず第1段階としておおよその系統数を設定するためのものである．なお，N_1 の大きさは都市の規模や街路網の大きさに応じて設定すればよいと考える．この場合 N_1 が十分に大きな値でない限り，N_1 個の候補系統では乗り換えを必要とする OD が生じることになるが，このような OD を直通輸送するために N_2 個ずつの候補系統を順次追加設定してゆくこととする．なお最初の N_1 個である程度の OD を直通できる

系統を設定しているので，N_2 はあまり大きな値をとる必要はない．たとえば N_1 が 100〜300 に対して，N_2 は 2〜5 程度でよい．

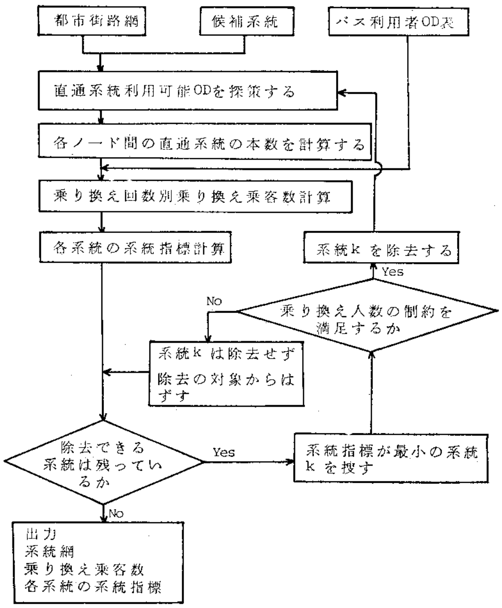
以上に述べたように，本サブモデルでは２つの系統数設定指標を導入することにより，大街路網ですべての OD に対して直通系統を設定する場合の候補系統数を有限個にしぼるための効果的な方法が見出された．

4．系統数限定サブモデル

（1） 本サブモデルの概要

本サブモデルは，バス利用者 OD 表，都市街路網と，**3.** で述べた候補系統設定サブモデルにより得られた候補系統を与件とし，そのフローチャートを **図—5** に示す．

本サブモデルは，都市全体の一定割合のトリップは乗り換えをすることを想定して系統数の限定を行う．この場合系統の単位リンク長当たりの乗客輸送人数を示す系統指標の値が小さい系統は輸送の重要性が相対的に低いとみなして，都市全体の乗り換え人数の制約の範囲内で順次系統の除去を行って，系統数を限定してゆく．本サブモデルでは，任意の OD トリップがある系統を直通系統として利用できるかどうかを示す直通系統行列から，グラフ理論の接点接続行列[7]の考え方を利用して，任意の乗り換え回数別 OD を示す乗り換え行列を算出する．これによってある段階で系統を除去したときの乗り換え回数別乗客数を容易に計算できる特徴をもっている．



図—5　系統数限定サブモデルのフローチャート

（2） 本サブモデルの仮定

系統数限定を行う段階では各系統の運行頻度は計算されないので，本サブモデルでは次に述べる輸送状態を仮定して，系統の限定を行う．

① ノード i から j へ行くときに利用可能な直通系統が n 本ある場合，この n 本に含まれる任意の系統はそれぞれ ij 間の OD トリップの $1/n$ ずつを輸送する．

② ノード i から j へ行くときに利用可能な直通系統がない場合，１回乗り換えで利用できる系統の組合せが n' 組あれば，その中の任意の１組の系統はそれぞれ ij 間の OD トリップの $1/n'$ ずつを輸送する．

③ バス利用者がバスを何回も乗り継いで目的地へ行くのは不便なので，乗り換えは最大１回までとする．なお定式化では，２回乗り換えの有無を調べるために，２回乗り換えの乗客数を求める．

（3） 定式化と計算手順

ここではモデルの計算手順をおって定式化について述べる．

① まず都市街路網と候補系統を入力し，系統 k を最短経路の直通系統として利用可能な OD の起点 $n_i^{(k)}$，終点 $n_j^{(k)}$ を探索する．最短経路と直通系統の条件を満足するためには，系統 k が起点から $i^{(k)}$ 番目に通過するノード $n_i^{(k)}$ と $j^{(k)}$ 番目に通過するノード $n_j^{(k)}$ の最短距離 $DS_{n_i^{(k)}n_j^{(k)}}$ が，系統 k を利用してノード $n_i^{(k)}$ から $n_j^{(k)}$ へ行くときの距離 $|i^{(k)}-j^{(k)}|$ と一致しなければならない．この関係を次式に示す．

$$DS_{n_i^{(k)}n_j^{(k)}}=|i^{(k)}-j^{(k)}| \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

なおダミーリンクのある **図—2** の例では，A から B への距離は３つのリンク長の和として表わされる．

ここでノード $n_i^{(k)}$, $n_j^{(k)}$ 間で系統 k を最短経路の直通系統として利用可能かどうかを示す直通系統行列 $\boldsymbol{S}^k$ の第 n_i, n_j 要素 $S_{n_in_j}{}^k$ を次式で定義する．

$$S_{n_in_j}{}^k=\begin{cases}1：式(1)を満足するとき\\0：式(1)を満足しないとき\end{cases} \quad \cdots\cdots (2)$$

② 次に任意のノード間で利用可能な直通系統の数を算出する．ノード i, j 間で利用できる直通系統の数を表わす行列を直通系統行列 $\boldsymbol{C}^{(0)}$ とする．この行列の第 i, j 要素 $C_{ij}{}^{(0)}$ は直通行列 $\boldsymbol{S}^k$ を任意の系統 k について加えればよいので，次式で示される．

$$C_{ij}{}^{(0)}=\sum_k S_{ij}{}^k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

③ 乗り換え回数別乗り換え人数を計算する．直通系統行列 $\boldsymbol{C}^{(0)}$ の ij 要素が 0 であればノード ij 間に直通系統が存在しないから，乗り換え回数が１回以上の利用者数 MC はバス利用者 OD 表 OD_{ij} の中で，$C_{ij}{}^{(0)}$

$=0$ を満足するノードの組 (i, j) について加えればよいので，次式で示される．

$$MC=\sum_{(i,j)\in\Phi}OD_{ij} \cdots\cdots(4)$$

ここに Φ：$C_{ij}{}^{(0)}=0$ を満たすノード (i, j) の集合，OD_{ij}：ノード i から j へ向かうバスの利用者数．

ij 間に直通系統が存在しない場合，バス利用者は i から j への最短経路上で任意のノード l で乗り換える．$C_{il}{}^{(0)}$, $C_{lj}{}^{(0)}$ を il 間，lj 間のそれぞれ直通系統数とすれば，i から j へ行く途中 l で乗り換える方法は $(C_{il}{}^{(0)}\times C_{lj}{}^{(0)})$ 通りある．1回乗り換えで ij 間を結ぶ組合せ数を1回乗り換え行列 $\boldsymbol{C}^{(1)}$ と定義すれば，この ij 要素 $C_{ij}{}^{(1)}$ はすべての乗り換え地点 l について，l で乗り換える方法の組を加えればよいので，次式で示される．

$$C_{ij}{}^{(1)}=\begin{cases}0 & ;\ C_{ij}{}^{(0)}\neq 0\\ \sum_{l}(C_{il}{}^{(0)}\cdot C_{lj}{}^{(0)}) & ;\ C_{ij}{}^{(0)}=0\end{cases} \cdots(5)$$

グラフ理論によれば，式 (5) は $\boldsymbol{C}^{(1)}=\{\boldsymbol{C}^{(0)}\}^2$ で示される[7]．なお $\boldsymbol{C}^{(1)}$ の i, j 要素は $C_{ij}{}^{(0)}\neq 0$ のとき式 (5) に示されるように0とおくことにする．グラフ理論の接点接続行列[7]の考え方によれば，1回乗り換え行列の i, j 要素 $C_{ij}{}^{(1)}$ が0でなければ，ノード i, j 間に最短経路の直通系統がなく，1回乗り換えで行ける方法が式 (5) に示す数だけある．

$C_{ij}{}^{(1)}\neq 0$ を満たすノードの組 (i, j) の集合を $\pi^{(1)}$ とすれば，1回乗り換えのバス利用者数 $MC^{(1)}$ は集合 $\pi^{(1)}$ について OD トリップを加えればよいので式 (6) で示される．

$$MC^{(1)}=\sum_{(i,j)\in\pi^{(1)}}OD_{ij} \cdots\cdots(6)$$

乗り換え回数が2回のバス利用者数 $MC^{(2)}$ は $C_{ij}{}^{(0)}=0$ かつ $C_{ij}{}^{(1)}=0$ を満たすノードの組 (i, j) の集合 $\pi^{(2)}$ について OD トリップを加えればよいので，次式で示される．

$$MC^{(2)}=\sum_{(i,j)\in\pi^{(2)}}OD_{ij} \cdots\cdots(7)$$

なお1回および2回乗り換え利用者数 $MC^{(1)}$, $MC^{(2)}$ は，乗り換え許容制約式(8)，式(9)をそれぞれ満足する必要がある．

$$MC^{(1)}\leq\alpha\cdot S \cdots\cdots(8)$$

$$MC^{(2)}\leq\beta\cdot S \cdots\cdots(9)$$

ここに α：1回乗り換え客の許容上限の全トリップに対する割合，β：2回乗り換え客の許容上限の全トリップに対する割合であり0とする，S：全トリップ数

④　系統指標を計算する．(2) で述べた輸送状態で，ノード ij 間を結ぶ系統が $C_{ij}{}^{(0)}$ 本あるとき，系統 k の輸送人数を系統長 L_k で除した値を系統指標 D_k と定義し，次式に示す．

$$D_k=\sum_{(i,j)\in\varphi^k}(DS_{ij}\cdot OD_{ij}/C_{ij}{}^{(0)})/L_k \cdots\cdots(10)$$

ここに DS_{ij}：ij 間の最短距離，OD_{ij}：ij 間で系統 k を利用可能な乗客数，$C_{ij}{}^{(0)}$：ij 間の直通系統数，φ_k：系統 k の経路上にあるノード (i, j) の集合．

⑤　除去できる系統が存在するかどうかを調べる．

系統指標が最小の系統から除去してゆくが，式 (8), (9) の乗り換え許容制約のために除去できない系統が存在する．そこで式 (11) に示す系統 k のラベル LA^k を定義し，除去の可・不可を判別する．

$$LA^k=\begin{cases}-1：すでに除去された系統\\ 1：除去できない系統\\ 0：どちらでもない系統\end{cases} \cdots\cdots(11)$$

もし式 (11) のラベルが 0 である系統が存在しなければ，⑧ へ進む．

⑥　ラベルが0の系統の中で系統指標が最小の系統 k' を除去した場合，式(8), (9) の制約を満足するか調べる．もし制約を満たさなければ $LA^{k'}=1$ とし，⑤ へ戻る．

⑦　系統 k' は除去され，$LA^{k'}=-1$ とし，① へ戻る．

⑧　すべての系統のラベルが ±1 となり，これ以上系統を除去できない．今までに1系統ずつ系統が除去された各段階ごとの残存する系統網と乗り換え人数を出力して計算を終了する．

5. 運行頻度設定サブモデル

(1)　本サブモデルの概要

本サブモデルはバス利用者 OD 表，都市街路網と，前節 **4.(3)** で得られた系統網を与件とする．

運行頻度を設定する場合，目的地までの直通系統がない乗客の乗り換えを考慮する必要がある．乗り換えを必要とする乗客にとっては，出発地の利用可能な系統とその運行頻度だけでなく，乗り換える地点の系統数と運行頻度も重要と考えられる．そこで本サブモデルでは，出発地で利用可能な系統の運行頻度に比例して利用するバス系統を選択し，乗り換える乗客は乗り換え地点で利用できる複数の系統の運行頻度の総和が最大のノードで乗り換えるものとする．この場合，運行頻度が変われば乗り換え地点も変動することになり，これは現実のバス利用者の経路選択の実情に近いと考えられる．

4. で述べた系統数限定サブモデルと同様に，本サブモデルは直通系統行列と乗り換え行列を用いて乗り換え乗客数を求め，系統別に区間乗客数を算出し，輸送量と需要量が等しくなるように運行頻度を繰り返し計算により設定し，バスの総走行距離，乗客の待ち時間を算定できる特徴をもっている．以下では本サブモデルの仮定を述

べ，次に定式化を行い計算手順を説明する．

（2） 本サブモデルの仮定

利用者の系統選択について次の仮定を設ける．

① ノード i から j へ行く利用者は利用可能な直通系統の運行頻度に比例して各系統を利用する．

② 乗り換えを必要とする利用者は，最初に利用する系統が通過するノードのうち，次に利用できる複数系統の運行頻度の総和が最大になるノードで乗り換える．

③ 待ち時間は利用する系統の運行間隔の 1/2 とする．

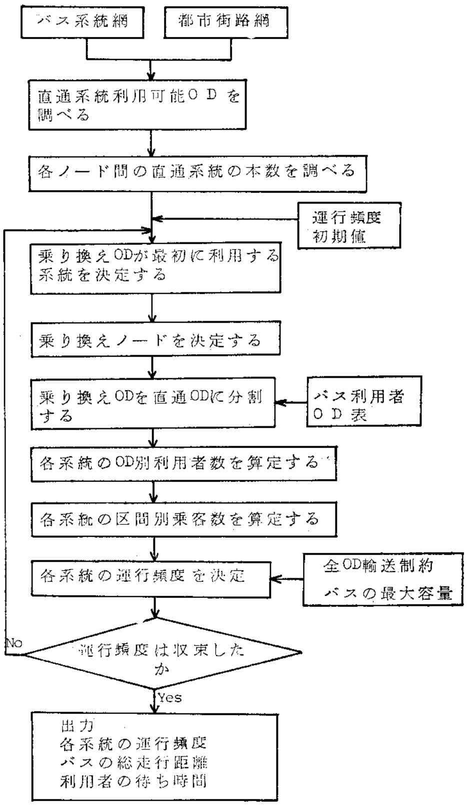
④ 乗り換え回数は1回とする．

（3） 定式化と計算手順

本サブモデルのフローチャートを図—6に示す．次にモデルの計算手順に従い定式化を行う．

① 都市街路網と系統網を入力し，**4.(3)①②** と同様に直通系統行列 $C^{(0)}$ を計算する．

② 乗り換えを要する OD が最初に利用可能な系統を探索する．i から j へ向かう 1 回乗り換えを必要とする OD については，$C_{ij}{}^{(0)}=0$ かつ 1 回乗り換え行列 $C_{ij}{}^{(1)}>0$ である．この i から j へ行く 1 回乗り換え



図—6 運行頻度設定サブモデルのフローチャート

を必要とする OD がノード i で利用可能な系統は，任意の乗り換え地点のノード l に対して次式 (12), (13)を満足する系統 k である．この系統の集合を ψ と定義する．

$$S_{il}{}^{k}\cdot C_{lj}{}^{(0)}>0 \cdots\cdots (12)$$

$$DS_{ij}=DS_{il}+DS_{lj} \cdots\cdots (13)$$

式(12)は i から j へ行く直通系統 k が存在し ($S_{il}{}^{k}>0$), l から j へ行く直通系統数 $C_{lj}{}^{(0)}$ が正であることを示す．

式(13)は ij 間の最短距離 DS_{ij} が，il 間，lj 間の最短距離 DS_{il}, DS_{lj} の和に一致することを示す．この式(13)を満足するノード l の集合を $\varDelta$ とする．

③ 運行頻度を計算する．

乗り換えを必要としない OD がノード i で利用可能な ij 間の運行頻度 $B_{ij}{}^{(0)}$ は，$S_{ij}{}^{k}=1$, すなわち ij 間を直通で結ぶ系統の集合 Γ について，任意の系統 k の運行頻度 F_k を加算して得られ，次式で示される．

$$B_{ij}{}^{(0)}=\sum_{k\in\Gamma}F_k \cdots\cdots (14)$$

同様にして，1回乗り換えを必要とする OD がノード i で利用可能なノード il 間の運行頻度 $B_{il}{}^{(1)}$ は，$S_{il}{}^{k'}>0$ を満足する系統の集合 ψ について，任意の系統 k' の運行頻度 $F_{k'}$ を加算して得られ，次式で示される．

$$B_{il}{}^{(1)}=\sum_{k'\in\psi}F_{k'} \cdots\cdots (15)$$

各系統の運行頻度 F_k, $F_{k'}$ は初期値を 1 とし，以後⑧で得られる値を用いる．

④ 乗り換えノードを決定する．

5.(2)② の仮定により，乗り換え後に利用できる系統の運行頻度の和 $B_{lj}{}^{(0)}$ が最大になるノードで乗り換えるので，i から j へ行く1回乗り換えを必要とする OD のうち系統 k' を最初に利用した乗客は，式(16)を満足する系統 k' 上のノード c で乗り換える．

$$B_{cj}{}^{(0)}=\max_{l\in\varDelta}B_{lj}{}^{(0)} \cdots\cdots (16)$$

ここに $B_{cj}{}^{(0)}$：cj 間の c 点で利用可能な運行頻度．

⑤ 乗り換え OD を直通 OD に分割し，各系統に配分する．**5.(2)①** の仮定より，i から j へ行く1回乗り換え OD のうち，i で最初に系統 k を利用する乗客数 $OA_{ij}{}^{k}$ は，i から j のバス利用者数 OD_{ij}, il 間の i で利用可能な系統の運行頻度の和 $B_{il}{}^{(1)}$, 系統 k の運行頻度 F_k を用いて次式で示される．

$$OA_{ij}{}^{k}=OD_{ij}\cdot F_k/B_{il}{}^{(1)} \cdots\cdots (17)$$

i から j へ行く1回乗り換え OD のうち，i から系統 k を利用した乗客は④で求めたノード c で乗り換えるから，$OA_{ij}{}^{k}$ は i から c まで系統 k を利用する乗客数 $OC^{k}{}_{ic(j)}$ と c から j まで c 点で利用可能な系統を利用する乗客数 $OC_{(i)cj}$ と一致し，これらの関係は次式で示される．

$$OC^k{}_{ic(j)} = OC_{(i)cj} = OA_{ij}{}^k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

さらに $OC_{(i)cj}$ は c 点で利用可能な cj 間を結ぶ直通系統の運行頻度の和 $B_{cj}{}^{(0)}$, c 点で利用する系統 k' の運行頻度 $F_{k'}$ を用いて，次式に示す系統 k' の利用者数 $OC_{cj}{}^{k'}$ に分割される．

$$OC_{cj}{}^{k'} = OC_{(i)cj} \cdot F_{k'} / B_{cj}{}^{(0)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

⑥ 各系統の区間別乗客数を計算する．

ノード ab 間で系統 k を利用する全乗客数を $OF_{ab}{}^k$ とする．これはステップ ⑤ において乗り換えなしで系統 k を利用する乗客数 OD_{ab}, a から j へ行く途中 b 点で乗り換えを必要とする乗客のうち ab 間で系統 k を利用する乗客数 $OC_{ab(j)}{}^k$, i から b へ行く途中 a 点で乗り換える乗客のうち ab 間で系統 k を利用する乗客数 $OC_{(i)ab}{}^k$, の和で表わされ，次式で示される．

$$OF_{ab}{}^k = OD_{ab}{}^k + \sum_j OC_{ab(j)}{}^k + \sum_i OC_{(i)ab}{}^k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

系統 k がリンク r で輸送する区間乗客数を $PS_r{}^k$ とする．これは系統 k が ab 間でリンク r を通るか否かを表わすパスマトリックス $M_{ab}{}^{kr}$ を用いて，すべての OD ペア (a, b) について $OF_{ab}{}^k$ を加算して求められ，次式で示される．

$$PS_r{}^k = \sum_{(a,b)} (OF_{ab}{}^k \cdot M_{ab}{}^{kr}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

ここに $M_{ab}{}^{kr}$ は，ab 間で系統 k がリンク r を通る場合，通らない場合でそれぞれ 1,0 の値である．

⑦ 各系統の区間乗客数を用いて各系統の運行頻度を設定する．すべての乗客を輸送するためには，系統 k の区間乗客数 $PS_r{}^k$ が最大となる区間の需要量と輸送力が等しければよいと考えれば，バス1台の最大乗車人員 C_p を用いて運行頻度 F_k は次式で示される．なお [ ] はこの中の実数の小数点以下を切り捨てることを表わす．

$$F_k = [\max_r (PS_r{}^k / C_p)] + 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

⑧ 運行頻度が収束するかどうか調べる．式(22)で求めた F_k がステップ ③ から ⑤ に用いた F_k と一致しなければ，式(22)の F_k を新しい運行頻度として，③ へ戻る．もしすべての F_k が ③ から ⑤ の F_k と一致すれば ⑨ へ進む．

⑨ 各系統の運行頻度は収束したので，各系統の運行頻度，バスの総走行距離，乗客の待ち時間，区間乗客数を出力して計算を終了する．

バスの総走行距離 D^b は，バス系統 k が通過するリンク r を示すバス系統マトリックス $M_r{}^k$, リンク長 d^r, 運行頻度 F_k の積で表わされ，次式となる．

$$D^b = \sum_k \sum_r F_k \cdot M_r{}^k \cdot d^r \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

乗客の待ち時間 W は，仮定 **5**.(**2**)③より，ノード ab 間で系統 k を利用する乗客数 $OF_{ab}{}^k$ と運行頻度 F_k を用いて次式で計算される．

$$W = \sum_a \sum_b \sum_k OF_{ab}{}^k / (2 \cdot F_k) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

以上で本サブモデルの定式化の説明を終わる．

6. 京都市のバス系統網へのモデルの適用とその考察

本節ではケーススタディとして京都市のバス系統網に本モデルを適用して試算を行い，結果を考察する．

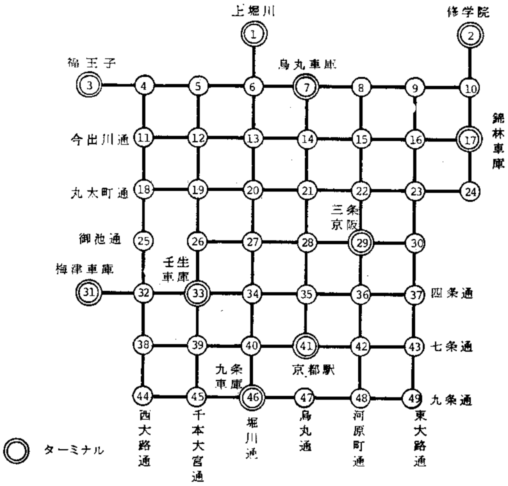
まずセレクタ N_1, N_2 を設定することによって，直通系統を有限個設定できることを示す．次に乗り換え乗客数をどの程度にするかは交通計画で定められると考えるが，ここでは1回乗り換え乗客数の上限を外生的に与えたときにどの程度系統数が限定されるかを示す．最後に運行頻度設定サブモデルでは，バス系統網の計画に有意義な総走行距離，平均待ち時間，乗車効率などの情報が得られ，少数系統で多頻度型の系統が設定されることを示す．

以下ではセレクタの3つの組について試算を行うが，これらの値を変えることにより，異なる各種の代替案の設定と代替案相互の比較が可能になると考えられる．

（1） インプットデータ

① OD 表と街路網，バスターミナル

OD 表は昭和 52 年京都市交通局が推計した値を用いる[8]．この OD は市周辺部を含む 109 ノード相互間であるが，本研究ではそのうち市街地内の 49 ノード相互間に限定し，朝のラッシュ1時間当たりの OD 表を用いる．街路網を図―7に示し，各ノードにはノード番号を付記するとともに，京都市に実在するバスターミナル，操車場，車庫を試算におけるターミナルとし，◎印で示す．



図―7 道路網とバスターミナル

② 第1および第2セレクタ N_1, N_2

系統の設定を行うには最初は許される限り多くの候補系統の中から輸送需要の多い系統を選定する必要がある．しかし本モデルの系統数限定サブモデルは候補系統が多ければ計算時間が長くなる．そこでこれらを考慮して，すべての OD トリップを乗り換えなしで直通輸送する有限個の候補系統を設定するために，第 1，第 2 セレクタ（N_1, N_2）の組として (200,3), (200,5), (300,5) の 3 つについて試算する．以下これをそれぞれケース 1,2,3 という．

③ バスの最大乗車可能人員（容量）を 80 人とする．

④ 系統長制約：往復，循環の系統について，バス系統の輸送効率と運行の容易さを考慮し，**表—3** に示すリンク長制約を設ける．

表—3 系統長制約の仮定

	最小リンク数	最大リンク数
往復系統	4	11
循環系統	8	18

⑤ 乗り換え許容制約：系統数限定サブモデルにおいて 1 回乗り換え乗客数の上限を設定する．これは都市の実情に基づいて定めるべきであるが，ここでは全 OD トリップの 15% までは 1 回乗り換えもやむを得ないものとする．

（2） 試算結果とその考察

ここでは，a）候補系統設定，b）系統数限定，c）運行頻度設定のそれぞれのサブモデルの試算結果を示し，結果の考察を行う．

a） 候補系統設定サブモデルの試算結果と考察

本試算のインプットデータでは，ケース 1，ケース 2，ケース 3 のそれぞれについて，FACOM-M 190 を用いた電子計算機の CPU 時間はそれぞれ 80 秒，60 秒，45 秒であった．この場合 N_1, N_2 が大きいほど CPU 時間が短いのは計算の繰り返し回数が少ないからである．各ケース間で共通に設定される候補系統の数を**表—4** に示す．

ケース 1，ケース 2，ケース 3 で全乗客を乗り換えなしで輸送するに必要な候補系統数はそれぞれ 251，256，337 本である．潜在的輸送需要の上位 100 位以内の候補系統数を起終点別に**表—5** に示す．すなわち，ノード 41-17，ノード 41-2，ノード 46-17，ノード 46-2 相互間を結ぶ候補系統数は合計 42 本あり，その他の系統よりも潜在的輸送需要が上位 100 位以内の割合が高い．これらの系統は OD 発生量の多いノード 29（三条京阪），35（四条烏丸），36（四条河原町）を通過するので，候補系統設定サブモデルによって需要の多いところに多数の候補系統が設定されることがわかる．

表—5 起終点別候補系統の数

起・終点ノード	候補系統数	潜在的輸送需要が上位 100 位以内の候補系統の数
41(京都駅)—3(錦林車庫) 41(同　上)—2(修学院) 46(九条車庫)—17(錦林車庫) 46(同　上)—2(修学院)	58	42
41(京都駅)—3(福王子) 41(同　上)—1(上堀川)	25	9
循環（京都駅を通る）	38	14
（京都駅を通らない）	71	15
その他	147	21
合計	339	100

b） 系統数限定サブモデルの試算結果と考察

本試算での電子計算機の CPU 時間は，1 回乗り換えを 15% まで許せば，ケース 1，ケース 2，ケース 3 の場合，それぞれ 300 秒，300 秒，580 秒であった．1 回乗り換えを 15% まで許容する場合，最終的に残った系統数を**表—6** に示す．表中最右欄には各ケースに共通に残る系統数（単に共通系統数とよぶ）を示す．**表—6** からケース 1，ケース 2，ケース 3 はそれぞれ 18, 17, 20 本の系統が残り，第 1 セレクタ N_1 が 200 の場合，N_2 が 3,5 の共通系統数は 13 本あり，この 2 つのケースは最終的に残る系統は比較的類似していることがわかる．1 回乗り換えを 15% まで許容するとした場合，系統数限定サブモデルによる試算の結果，現行の 121 系統が大きく減少し，**表—6** に示すように 17 ないし 20 の系統に限定された系統網が得られることがわかる．

なお最終的に選定される系統の数は，1 回乗り換えの許容パーセントが小さくなれば増加する．ここで残存する系統の数（以下単に系統数と略す）は，たとえばケー

表—4 各ケースの候補系統の数とケース間に共通な候補系統の数

	ケース1	ケース2	ケース3	共通な候補系統の数
3つのケースに共通の系統	○	○	○	249
ケース1とケース3に共通の系統	○		○	2
ケース2とケース3に共通の系統		○	○	5
ケース2のみに設定される系統		○		2
ケース3のみに設定される系統			○	81
候補系統の数の合計	251	256	337	339

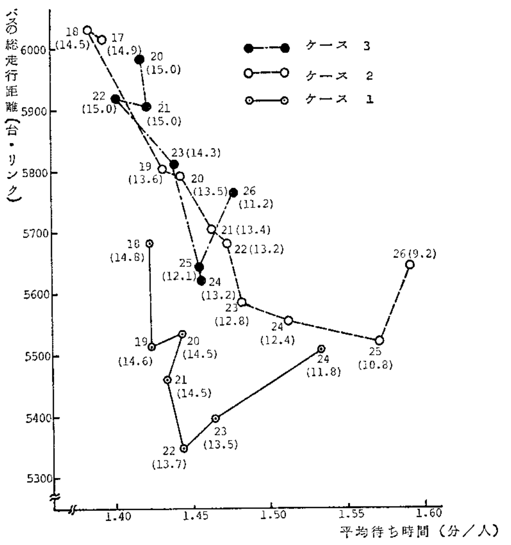
表—6 ケース別最終的に残る系統数

	ケース1	ケース2	ケース3	共通系統数
ケース 1 のみに残る系統	○			5
ケース 2 のみに残る系統		○		2
ケース 3 のみに残る系統			○	11
ケース 1，2 に共通して残る系統	○	○		6
ケース 2，3 に共通して残る系統		○	○	2
3つのケースに共通して残る系統	○	○	○	7
合計	18	17	20	

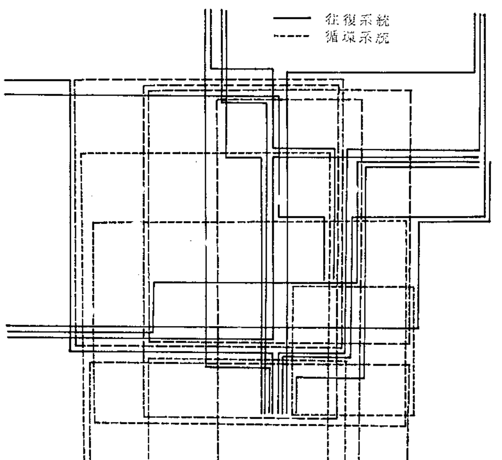
ス1の場合，最終的には 18 であるが，1回乗り換えの許容パーセントが低くなれば 19, 20, 21…と増加する．そこでこの最終的に選定される系統数より1本ずつ増えていく各段階の系統網を次の運行頻度設定サブモデルに入力した．

c）　運行頻度設定サブモデルの試算と考察

各ケースごとの試算結果について，乗客の平均待ち時間と総走行距離の関係を 図—8 に示す．図中の各点に付記した数字は設定系統数と，（　）には1回乗り換え人数の全トリップに対する割合（%）をそれぞれ表わしている．この図からケース1では 22 系統，ケース2では 25 系統，ケース3では 24 系統の場合に総走行距離が最小になることがわかる．このうちケース1の場合に得られた 22 系統を 図—9 に示す．図—10，図—11 では，各ケースごとの試算結果について，系統数と平均待ち時間，系統数と総走行距離の関係をそれぞれ示している．なお1つの系統網の計算機 CPU 時間は 4〜5 分である．試算では最も少ない系統数の場合から1系統ずつ増加させていき，総走行距離が最小になる系統数を越えた時点で計算を終了している．



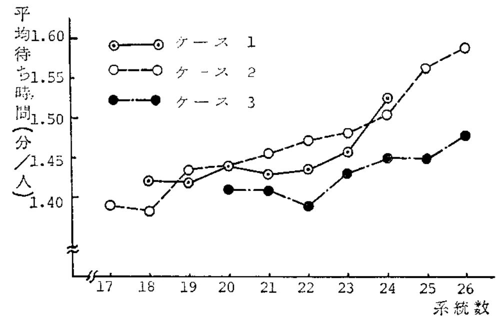
図—8　待ち時間と総走行距離の関係



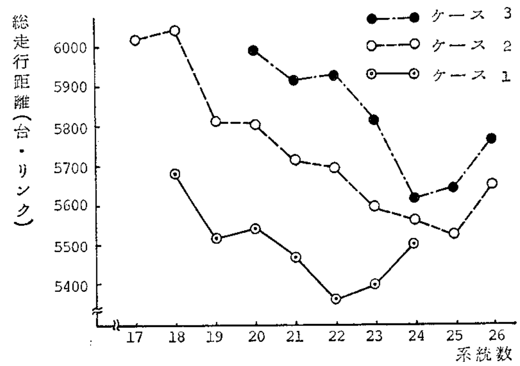
図—9　ケース 1 の場合の総走行距離が最小となる系統網

各ケースで総走行距離が最小になる系統網の場合について，各系統の平均乗客数の度数分布を 図—12 に示す．ケース 1, 2, 3 のいずれも平均乗客数は最低 30 人，最高 65 人程度，ほとんどの系統は 40 人以上あり，平均値はそれぞれ 48.8 人，48.5 人，47.6 人，である．この乗客数の平均値をバスの容量で割った値を平均乗車効率とよぶこととする．

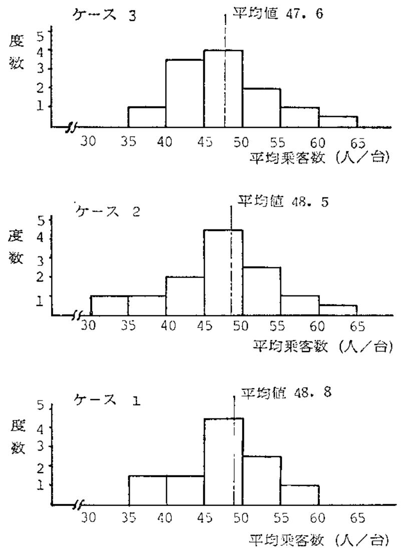
図—13 は3つのケースの利害得失を比較するために，乗客の平均待ち時間，総走行距離，1回乗り換え乗客数の割合，平均乗車効率という4種の評価指標値を，4つの軸とも原点から遠ざかる方が好ましいようにして図示したものである．この図からケース1は，総走行距離，乗客の平均待ち時間，平均乗車効率とも他の2ケースより優れているが，その代わりに乗り換えを必要とする乗客数が多いことがわかる．総走行距離が短ければ，バスの総走行コストが少なく，しかも平均乗車効率が高ければ，バスの走行1キロ当たりの運賃収入が多くて，事業



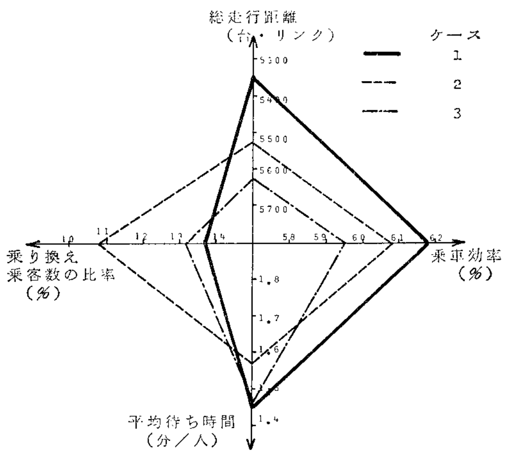
図—10　系統数と平均待ち時間の関係



図—11　系統数と総走行距離の関係



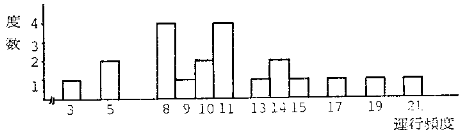
図―12　ケース別平均乗客数の度数分布



図―13　3 つのケースの特徴比較

者に有利と考えられる．一方利用者にとっては，待ち時間が少ないことは有利であるが，ケース 2,3 に比べて 2 ないし 3 系統少なく設定されるため，乗り換え回数が増加するという不利があるので，これらを総合してどのケースを選ぶべきかを判断すべきである．

次にここでは特にケース 1 について，系統網の系統別運行頻度の度数分布を 図―14 に示す．図から運行頻度は最低 3 本/時，最高 21 本/時，平均 10.5 本/時であるが，運行頻度が 5 本/時以下すなわち 12 分以上の運転間隔はわずかに 3 つの系統であり，ほとんどは 8 本/時以上，すなわち運転間隔は 8 分以内となっている．



図―14　ケース 1 の運行頻度の度数分布

7. むすび

本研究では，バス利用者の乗り換え回数を少なくしつつ，同時に系統数をなるべく少なくして，運行頻度と運行効率を高めるという互いに排反する要素を勘案して，最も好ましいバス系統網の設定を行うバス系統の設定計画モデルを提案した．

本研究のモデルによって次の点が可能となった．

（1）大都市の街路網では設定する系統網が膨大になるが，2 つのセレクタを導入することにより，まずすべての乗客を目的地に直通させるために必要な有限個の系統を抽出することができた．従来の多くの研究ではこのような系統は外生的に与えられているが，本研究のモデルでは内生化したので，バス事業経営者の勘と経験によらず系統設定を客観的に行うことが可能となった．

本モデルでは格子状街路網を対象としているが，ダミーノード，ダミーリンクを導入することにより，一般の街路網を格子状街路網に置き換えることができるので，一般の街路網への適用も可能と考えられる．

（2）従来の研究では，一般に乗り換え地点は固定あるいは定められた経路を通ると仮定した定式化が行われていたが，本研究のモデルでは，各系統ごとのバスの運行頻度が変われば最短時間経路が変わるので，それにつれて各 OD の乗客の乗り換え地点も変動することを定式化に取り入れたので，乗客の経路選択の実情に近づけることができた．なおこの乗客による複数系統の選択の考慮は直通・乗り換えいずれのバス系統についても行った．

（3）本研究のモデルではグラフ理論を利用した直通系統行列，乗り換え行列を用いているので，容易に乗り換え回数別乗客数を計算でき，これによって許容乗り換え回数を考慮したバスの運行頻度の設定が可能となった．従来の研究では直通についてのみ複数系統の選択を考慮していたが，本研究によって乗り換えを含む利用者の系統選択の実情に近づけることができた．

（4）全 OD トリップの一定割合までは 1 回乗り換えもやむを得ないものとすることにより，大都市では多数考えられる系統をどの程度まで限定できるかを明らかにした．

（5）一般に多系統の場合は乗り換え回数が少ない代わりに運行頻度が小さいという排反的な要素があるが，本研究のモデルによりこの両者を同時に考慮しつつ，任意の都市のバス系統を計画する場合に有益な判断資料を提供することができた．

本研究のモデルをトータルシステムとして適用することにより，都市全体の乗り換え人数の割合の仮定に応じて，設定すべきバス系統網と，その各系統ごとの運行頻度，総走行距離，乗り換え乗客数，乗客の待ち時間，乗車効率がどのように変化するかを知り，その中から利用者の利便やバス事業経営者の経営収支などの総合的な観点から最も好ましいバス系統網を見出すために有意義な情報が得られた．

なお乗客の目的地までの所要時間は，一般にバスの系統が通る道路区間の交通量や，バス専用レーンの設置などにより変化するが，本研究ではこの影響を考慮していない．またスムースなバスの運行のために必要な各リンク当たりの最大運行回数，地下鉄との競合・補間関係について考慮していない．大阪市で実施されているゾーンバスのルートを本研究は扱っていないが，本研究のモデルで設定されるルートを幹線と考え，ゾーンに対するルートは別途に設定すればよいと考える．以上に述べた点を考慮してモデルを改良するのが今後に残された課題であると考える．

参考文献

1) 森地　茂・岩井壮三・鈴木純夫：バス輸送改善のための基礎的考察，土木学会論文報告集，第238号，pp. 61～68, 1975 年6月．
2) 飯田恭敬・吉田豊穂・中村光生：バス路線網の構成と評価に関する考察，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp. 220～221, 昭和 50 年 10 月．
3) 奥谷　巌・牧野芳男：バス運行の乗り換えシステムと路線系統システムの比較，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp. 134～135, 昭和 51 年 10 月．
4) 森地　茂・鈴木純夫：バス路線網再編手法に関する研究，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，第 4 部，p. 136, 昭和 51 年 10 月．
5) 枝村俊郎・森津秀夫・松田　宏・土井元治：最適バス路線網構成システム，土木学会論文報告集，第 300 号，pp. 95～107, 1980 年8月．
6) 銭谷善信：バス系統網の自動設定手法に関する研究，交通科学，Vol. 10, No. 2, pp. 1～10, 1981 年5月．
7) 服部嘉雄・小沢孝夫：グラフ理論解説，昭晃堂，pp. 25～26, pp. 57～60, 昭和 49 年 11 月．
8) 京都市交通局：交通調査資料，昭和 52 年．

（1981.4.23・受付）