

最適バス路線網構成システム

A SYSTEM FOR OPTIMAL DESIGN OF A BUS
TRANSPORTATION NETWORK枝村俊郎*・森津秀夫**・松田 宏***・土井元治****
By Toshiro EDAMURA, Hideo MORITSU, Hiroshi MATSUDA
and Motoharu DOI

1. はじめに

バスの輸送機関としての長所の1つは、路線や運行回数を変更し、容易に需要の変化に対応できることである。しかしながら、路線設定や運行回数の変更作業は、従来はもっぱら計画者の経験や勘によっており、そのため改善もしばしば部分的な手直しにとどまり、長所を生かして路線網全体を最適に維持あるいは計画するようなことはほとんど行われなかった。

現在バス事業の多くは赤字経営であり、経営改善のためにも路線網を需要に即したものにし、無駄をなくすとともに利用者に便利なものとする必要に迫られている。電子計算機を応用して、路線網の決定を合理的にかつ容易に行えるシステムの開発が切に望まれているゆえである。

バス路線網計画において決定しなければならないのは路線網、路線系統、運行回数、配車計画、乗務員の勤務表である。これらは相互に関連しあっており、しかもそれぞれ決定の自由度の範囲は広いから、全体としてそのシステムをとらえ、合理的な目標を設定して最適なシステムを設計することは容易ではなかった。このためバス路線網に関する研究はすでにいくつみられるが^{1)~3)}、路線網全体の計画に関する研究³⁾は最近ようやく現れたところである。われわれのここに提案するのは、バス利用 OD 需要とバスの保有台数を与えた条件のもとで、バスの走行する道路網の限定、検討路線の列挙、最適な路線網の決定および運行回数の決定を電子計算機内で一貫して行うシステムである。このうち路線系統を列挙したときの運行回数の決定はむしろ容易であり、われわれ

の初期の研究でもこのことを取り扱っていた¹⁾。路線網案を電子計算機内で作製する作業は、今回のこのシステムの中において主要かつ困難な部分であり、そこでは最適交通ネットワーク問題の解法^{4),5)}の発展、応用が行われている。

この報告では、最初に最適バス路線網構成システムの概要について述べ、以下全体を構成する4つのサブモデルについてその内容を紹介する。最後に尼崎市営バス路線網に対して実際に適用したケーススタディについて述べる。

2. 最適バス路線網構成システムの概要

このシステムで決定するのは、運行するバス路線とその運行回数とする。そしてバス台数や路線数の制約下で国民経済的に、いいかえれば利用者に対して最適な路線網と運行回数を求めたいものとする。利便性を総所要時間で表すと、問題の全体は次のように表現できる。

$$\min Z = \sum_i \sum_j \{t_{ij}^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + t_{ij}^2(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

$$+ t_{ij}^3(\mathbf{x}, \mathbf{y})\} q_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_k x_k \leq M \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\sum_i \sum_j r_{ijkl}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) q_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{y_k} \leq C \dots \dots \dots (3)$$

$$\sum_k a_k x_k y_k \leq B \cdot T \dots \dots \dots (4)$$

$$r_{ijkl}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 1 \dots \dots \dots (5)$$

$$r_{ijkl}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0 \dots \dots \dots (6)$$

$$x_k = 0 \text{ or } 1 \dots \dots \dots (7)$$

$$y_k = 0, 1, 2, \dots \dots \dots (8)$$

ここに、

t_{ij}^1 : i から j へのトリップのバス待ち時間

t_{ij}^2 : i から j へのトリップの乗車時間・バスを使わないときは徒歩所要時間とする。

t_{ij}^3 : i から j へのトリップの乗換時間

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 京王帝都電鉄(株)

**** 正会員 工修 (株)片平エンジニアリング

q_{ij} : i から j へのトリップ数
 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots\}$
 : 路線 k が路線網に含まれるとき $x_k=1$, 含まれないとき $x_k=0$ とする.
 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_k, \dots\}$
 : 路線 k の運行回数
 r_{ijkl} : i から j へのトリップのうち, 路線 k の区間 l を通過するものの割合
 a_k : 路線 k の往復運行所要時間
 M : 最大路線数
 C : バスの定員
 B : 運行可能バス台数
 T : バス運行時間

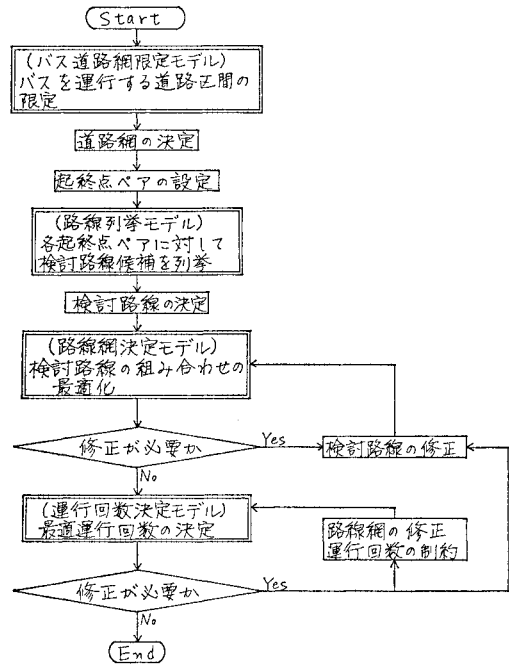
目的関数は総所要時間の最小化である. 制約式は式 (2) が路線数の制約, 式 (3) が乗客数が定員以下という制約, 式 (4) がバス台数の制約である. この定式化においては, OD パターンや乗車経路などは路線網と運行回数によって変化するように表現されている.

最適路線網を得るには, 基本的にはすべての路線のあらゆる組み合わせに対して最適な運行回数を決定し, 目的関数を比較しなければならない. しかし実際問題におけるネットワークでは, 実行可能な路線の数は膨大で, その組み合わせは無限といってもよい. この点が限られた数のリンクの組み合わせを調べる一般的な最適交通ネットワーク問題と異なる点である. さらに運行回数を決める問題自体が非線形整数計画問題であり, 解を得るにはかなりの計算を要する. これらのことからたとえ若干の仮定を設けて問題を単純化しても, 式 (1)~(8) の問題をそのまま解くことは困難である. そこで全体を部分的最適化問題に分割することにする. すなわち, まず可能なすべての路線の中からいくらかの検討路線を選び, 次にそれらの中から最適な路線の組み合わせを作り, 最後に路線網を構成する路線に対して最適な運行回数を決めるものとする.

最適化問題をこのように分割し, 最適ネットワーク構成手法を適用するために次の仮定を設ける.

- ① 需要交通量は路線網, 運行回数によって変化しない.
- ② 乗車経路は路線網によって決まり, 運行回数によっては変わらない.

このシステムでは, バスの運行が可能なすべての道路区間でネットワークを構成しそこに路線網を設定する. 2つの仮定のもとで上に述べた方法で路線網を作ると, 場合によっては運行回数の少ない路線がネットワーク全体に広がるのが起こり得る. これではフリークエントサービスの点からは魅力のない路線網になり, 需要が計算に用いたものと大きく違ってしまうと考えられる. そ



図一 最適バス路線網構成システム

ここで, このようなときにも対処できるように, 検討路線を選ぶ前にバスを運行する道路区間を限定することにする.

以上のようにすれば, 最適バス路線網構成システムはバス路線網限定モデル, 路線列举モデル, 路線網決定モデル, 運行回数決定モデルの4つのサブモデルから作られる. 各モデルが路線網の評価要因をすべて考慮できないことと, 最適化問題を分割した欠点を補うため, および主観的な判断を加えざるを得ない場合に対処するために, 人間が判断, 修正しフィードバックさせる部分を加えれば, システムのフローチャートは 図一1 のようになる.

なお, このシステムではリンク長や路線長などの長さはすべて時間で表すことにする.

3. バス道路網限定モデル

このモデルは, 対象地域のバスの運行が可能な道路区間のうち, 路線の設置を検討する道路区間を決めるものである. 停留所を表すノードとバスの運行が可能な道路区間を表すバスリンク, 隣接停留所間の徒歩リンクで最大ネットワークを作成し, バスリンクの合計長が定められた値以下で総所要時間が最小のネットワークを求めるものとする. ただし, このモデルの段階では路線に関することは何も決まっていないので, 待ち時間や乗換時間は考えない. これを定式化すれば次のようになる.

$$\min Z = \sum_i \sum_j q_{ij} t_{ij}(x) \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k l_k x_k \leq L \dots \dots \dots (10)$$

$$x_k = 0 \text{ or } 1 \dots \dots \dots (11)$$

ここに、

q_{ij} : ij 間のトリップ数

t_{ij} : ij 間の最短所要時間でネットワークにより異なる。

l_k : バスリンク集合 k に属するリンクの長さの合計

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots\}$

: バスリンク集合 k がネットワークに含まれるとき $x_k=1$, 含まれないとき $x_k=0$ とする。

L : ネットワークに含まれるバスリンクの長さの合計の制約値

バスリンク集合の組み合わせを調べるように定式化したのは、リンクの表す停留所間の道路区間ごとの取りはずしを検討する必要はなく、交差点間のようにいくつかのリンクをまとめた単位での取りはずしを検討すればよいからである。解法には backward 法で得られた解の近傍を厳密解法で調べる近似解法⁴⁾を使う。

このモデルで得られる解ではターミナル以外の地点で道路がとぎれてしまい、実際にはバスの方向転換ができず、運行不可能な部分が含まれることもある。このような点を修正することが次の道路網の決定のステップである。なお、こうして決めた道路区間にはバスが運行される可能性があるということのみで、選ばれた路線の組み合わせによってはバスが運行されない道路区間が生じることもある。

4. 路線列挙モデル

このモデルは与えられた起点、終点の停留所間を結ぶ路線のうち、定められた路線評価関数の値の大きなものを列挙する機能をもつものである。

路線の起点、終点ではバスが方向転換できなければならないので、起終点になり得る停留所は限られる。そしてこれらの方向転換が可能な任意の停留所間には路線を設定できるのであるが、明らかに路線を設ける必要のないものもある。そこで不要な路線を探索する計算を省くために、まずトリップ分布などを考慮して検討の必要のある起終点の組み合わせを作り、それぞれの起終点ペアに対してこのモデルを適用し、検討路線候補を列挙するものとする。

(1) 路線列挙モデルのアルゴリズム

路線列挙モデルでは、バス道路網限定モデルの結果を修正したネットワーク上で、与えられた起点から終点に至る路線を探索する。単に起終点間を結べばよいのであれば路線は無数に存在する。しかしどのような路線にもすべてバスを運行させるということはできない。そこで次の検討路線として必要な条件を設け、これらの条件を満たす路線に対してだけ路線評価値を計算し、その値が大きければ検討路線候補とする。

- ① 路線長が指定される最短路線長以上、最長路線長以下である。
- ② 路線がループを含むとき、その長さが最長ループ長以下である。また同じノードを 3 回以上通らない。
- ③ あるノードから直前に通過したノードにもどらない。
- ④ 同じリンクを 2 回以上通らない。

① は路線が短ければ両端での折り返しのための損失時間の割合が大きくバスの運行効率が悪く、長すぎれば運行が不正確になりやすいためである。② はループが路線に含まれればループを 1 周させられる乗客ができるので、その長さを制限するものである。また同じ理由から同一の停留所を 3 回以上通ってはならないとし、複雑なループができないようにする。③ は任意の停留所で方向転換できないようにするためである。④ は利用者にはわかりにくい複雑な路線を除くためである。ただし、リンクはすべて有向リンクとするので同じ区間を逆に通ることは妨げられない。

路線列挙問題はリンクの順列を作るもので、解法には組み合わせトリーを使う陰的列挙法が適用できる。この問題の場合、組み合わせトリーの節点はネットワークのノードを表し、枝は路線に採択されたリンクを表すようにする。そして組み合わせトリーの出発点の節点は、路線の起点のノードに対応させる。検討路線の制約条件に従った分枝規則を設けると、路線列挙モデルのアルゴリズムは次のようになる。

- ① 各ノードから終点ノードまでの最短所要時間 d_{it} を求め、 $L_i^a = L^{\max} - d_{it}$ とする。
- ② 初期値として $L=0, i=s, r=2, x_k=0 (k=1, 2, \dots, m), R_1=0, y_j=0 (j=1, 2, \dots, n, j \neq s), y_s=1$ とする。
- ③ $k=A_i$ とする。
- ④ $x_k=1$ あるいは $b_k=R_{r-1}$ なら ⑪ へ
- ⑤ $i=a_k$ とし、もし $L+l_k > L_i^a$ なら ⑪ へ
- ⑥ $y_i=0$ なら ⑧, $y_i=2$ なら ⑪ へ
- ⑦ ループ長を求め、最長ループ長を超えていれば

- ⑪ へ
- ⑧ $L=L+l_k, R_r=k, r=r+1, x_k=1, y_i=y_i+1$ とする。もし $i \neq t$ なら ③ へもどる。
- ⑨ $L < L^{\min}$ なら ③ へもどる。
- ⑩ R_2, \dots, R_{r-1} で表される路線に対して路線評価値を計算する。すでに求められている路線とこの路線の中で評価値の大きいもの N 個を記憶する。③ へもどる。
- ⑪ $k=B_k$ とし、 $k > 0$ なら ④ へもどる。
- ⑫ $r=r-1$ とする。 $r=1$ なら ⑭ へ
- ⑬ $k=R_r, x_k=0, L=L-l_k, i=a_k, y_i=y_i-1$ とし ⑪ へ
- ⑭ 記憶されている路線を評価値の順に出力し計算終了

ここに、

- d_{ij} : ij ノード間の最短所要時間
- L_i^a : ノード i における許容路線長
- L^{\max} : 最長路線長
- L^{\min} : 最短路線長
- L : 路線長
- R_r : 路線の通過リンク番号
- A_i : ノード i を起点とするリンクのうち、最小のリンク番号
- B_k : リンク k と同じノードを起点とするリンクのうち、 k の次に小さいリンク番号、該当するリンクがなければ $B_k=0$ とする。
- a_k : リンク k の終点のノード
- b_k : リンク k と起点、終点が逆のリンク
- l_k : リンク k のリンク長
- x_k : リンク k が路線に含まれているとき 1, 含まれていないとき 0 とする。
- y_i : ノード i の通過回数
- N : 列挙路線数
- s : 路線の起点ノード
- t : 路線の終点ノード
- m : リンク数
- n : ノード数

計算例として 図-2 の最大ネットワークで、起点がノード 1、終点がノード 8 で最短路線長が 10、最長路線長が 50、最長ループ長が 30 の場合の組み合わせトリーの一部を 図-3 に示す。この図にはリンク番号、ノード番号、路線長も示す。また、図-3 で得られた路線は 図-4 に示す。

路線を列挙するアルゴリズムは以上のとおりであるが、計算例からもわかるように、分岐の起こらないノードは路線を探索するネットワークからは除いてもかまわない。そこで計算時間を短縮するためアグリゲーション

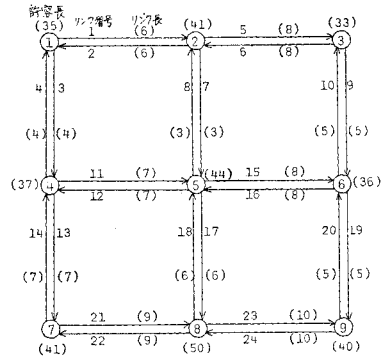


図-2 最大ネットワーク

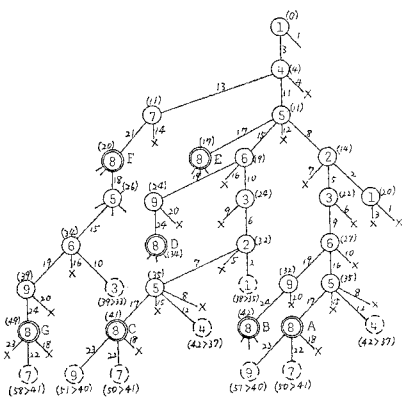


図-3 路線探索の組み合わせトリー

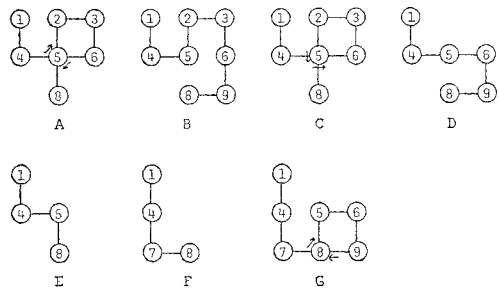


図-4 列挙された路線

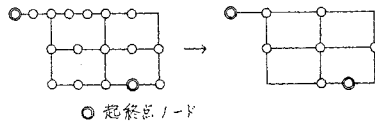


図-5 ネットワークのアグリゲーション

を行ったネットワークで路線を探索することにする。アグリゲーションとは、図-5 のように不要なノードを除き、リンクをまとめるものである。

(2) 路線評価関数

列挙された路線の良否を判断する指標として路線評価

関数を設ける。路線を評価する基準は多くあるが、次の基本的な条件を満たしていることが運行者と利用者双方に望ましいと考えられる。

- ① 利用する乗客が多いこと
- ② 各停留所間の最短経路を成していること

乗客が多ければ収益は多く、一方利用者の需要に答えていることになる。そして最短経路をなしていれば乗客は早く目的地に着け、運行者にはバスの運行効率がよいことになる。そこでこれらの条件を盛り込んだ路線評価関数を作成し検討路線候補を列挙する。さらに区間別、方向別の乗客数の変化などの他の評価基準を考慮して検討路線を決定する。

乗客の多さの表し方は何通りかあるが、どれだけの需要を満たしているかという点からは総乗車時間あるいは総乗車距離が適している。しかし、総乗車時間は消化した需要を表しているのではなく、遠回りして乗車している場合、迂回した分の乗車時間は本来の需要ではない。そこで、その路線での乗車時間ではなく、最低限乗らねばならない時間である乗客の起終点間の最短所要時間を合計する。そして、これらだけでは路線を長くするほどよいことになるので、単位路線長当りの値を使用する。式に表せば次のようになる。

$$F_1 = \frac{\sum_i \sum_j q_{ij} d_{ij}^0}{L} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

- q_{ij} : ij 間のトリップ数
- d_{ij}^0 : ij 間の最短所要時間
- L : 路線長
- i, j : 路線上のノード

② の条件については 総乗車時間に対する 最短所要時間の合計の割合で表す (式 (13))。

$$F_2 = \frac{\sum_i \sum_j q_{ij} d_{ij}^0}{\sum_i \sum_j q_{ij} d_{ij}} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、

- d_{ij} : ij 間の乗車時間

式 (12), (13) より路線評価関数を式 (14) のように定める。この評価関数の値が大きいくほどよい路線であるとするわけである。

$$F = F_1 \cdot F_2 = \frac{(\sum_i \sum_j q_{ij} d_{ij}^0)^2}{L \sum_i \sum_j q_{ij} d_{ij}} \dots\dots\dots (14)$$

5. 路線網決定モデル

路線列挙モデルで検討路線候補を列挙し、それらから検討路線を決定した後、このモデルで路線の組み合わせを決める。

(1) 路線網決定問題の定式化

システム全体の目的関数は式 (1) のように考えていたが、OD 表と乗車経路に対する仮定を設けたので、乗車時間は路線の組み合わせだけで決まることになる。乗換時間はバス運行回数が決まらなければ求まらないが、乗車経路は運行回数によって変化しないとしているので、乗換回数は路線網によって決まる。そこでどの検討路線を路線網に含めるかを定めるにあたっては、総乗車時間が短く、かつ乗換回数を少なくする。定式化すれば次のようになる。

$$\min Z = \sum_i \sum_j q_{ij} \{ (d_{ij} + r t_{ij}) y_{ij} + (d_{ij}^0 + p) (1 - y_{ij}) \} \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{s.t. } \sum_k x_k \leq M \dots\dots\dots (16)$$

$$\sum_i \sum_j q_{ij} (d_{ij} + p) (1 - y_{ij}) \leq P \dots\dots (17)$$

$$t_{ij} \leq N \dots\dots\dots (18)$$

$$x_k = 0 \text{ or } 1 \dots\dots\dots (19)$$

$$y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \dots\dots\dots (20)$$

ここに、

- t_{ij} : ij ノード間の乗換回数

- y_{ij} : ij ノード間に経路があるとき 1, 経路がないとき 0 とする。

- d_{ij}^0 : 最大ネットワークにおける ij ノード間の最短所要時間。ただし、最大ネットワークで経路がないときは $d_{ij}^0 = 0$ とする。

- x_k : 路線 k がネットワークに含まれるとき 1, 含まれないとき 0 とする。

- r : 乗換抵抗

- p : 経路がないときのペナルティー

- M : 路線数の上限値

- P : ペナルティーの上限値

- N : 最大乗換回数

目的関数は総乗車時間と乗換抵抗、経路がないときのペナルティーの和の最小化である。式 (15) の d_{ij} , t_{ij} , y_{ij} はいずれも x_k によって決まる。経路がないときのペナルティーを設けたのは、場合によってはバスを利用できないトリップが生じてもよいとするためである。式 (16) はネットワークに含まれる路線数に対する制約である。式 (17) は経路がないときのペナルティーに上限値を設け、バスを利用できないトリップの増加を制限するものである。上限値の与え方によっては全トリップがバスを利用可能にすることもできる。式 (18) は乗換回数を N 回以内とするもので、 $N+1$ 回以上必要ならばそれらのノード間に経路はないとして扱う。また乗車経路の選択は乗換回数が最も少ない経路の中から最短所要時間の経路を選ぶものとする。

路線網決定モデルの適用にあたり注意しなければならないのは、他の検討路線に完全に含まれる検討路線は目的関数の改善に寄与しないことである。路線長やバスの運行に関する制約も設けていないので、他の検討路線に完全に含まれる路線を路線網に含めるかどうかをここで調べることができない。そこで検討路線のうち、他の検討路線に完全に含まれることのない路線だけをこのモデルの対象とし、得られた路線網を構成する路線とそれらに含まれる路線に対して運行回数を決める。

(2) アルゴリズム

この問題は路線の組み合わせを扱うのであるが、リンクの組み合わせを扱う問題と同じ解法を用いることができる。しかし、ここで解くのは元の問題を分割、単純化した一部であり、かなり大きなネットワークを対象とするため簡単な近似解法が適している。そこで単純な backward 法をここでは使用する。計算手順は図-6 に示すように、すべての路線を含んだ最大ネットワークから出発し、1路線を除いたときの目的関数値の増加が最小となる路線を除く操作を実行可能になるまで繰り返す。

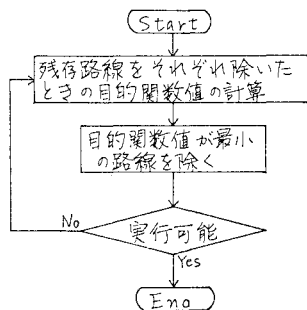


図-6 路線網決定モデルの計算手順

目的関数の計算では乗車時間を求めるために乗り換えを考慮した最短経路問題を解かねばならない。この部分のアルゴリズムは次のようになる。

- ① 初期値として $n=0$ 、すべての ij について $d_{ij} = \infty$ 、 $y_{ij}=0$ とする。
- ② $q_{ij} > 0$ の ij に対し、

$$d_{ij} = \min_k \{d_{ijk} | x_k=1, d_{ijk} < \infty\} \dots\dots\dots (21)$$
 によって d_{ij} を決める。もし d_{ij} が決まれば $t_{ij} = 0$ 、 $y_{ij}=1$ とする。すべての $q_{ij} > 0$ の ij について、 $y_{ij}=1$ になれば ⑧ へ
- ③ $i \in T$ 、 $q_{ij}=0$ の ij に対し、式 (21) によって d_{ij} を決める。 d_{ij} が決まれば $t_{ij}=0$ 、 $y_{ij}=1$ とする。
- ④ $n=n+1$ とする。
- ⑤ $q_{ij} > 0$ 、 $y_{ij}=0$ の ij に対し、

$$d_{ij} = \min_h \{d_{ih} + d_{hj} | h \in T, t_{ih}=0, t_{hj}=n-1\} \dots\dots\dots (22)$$
 によって d_{ij} を決める。もし d_{ij} が決まれば $t_{ij} = n$ 、 $y_{ij}=1$ とする。すべての $q_{ij} > 0$ の ij について $y_{ij}=1$ になれば ⑧ へ

- ⑥ もし $n=N$ ならば ⑧ へ
- ⑦ $i \in T$ 、 $q_{ij}=0$ 、 $y_{ij}=0$ の ij に対し、式 (22) によって d_{ij} を決める。 d_{ij} が決まれば $t_{ij}=n$ 、 $y_{ij}=1$ とする。④ へもどる。
- ⑧ 式 (15) によって目的関数値を求める。ただし式 (17) が満たされていないときは $Z = \infty$ とする。

ここに、
 d_{ijk} : 路線 k による ij 間の所要時間
 T : 乗り換えが可能なノードの集合
 n : 乗換回数

バス停留所間 OD 表ではトリップのない起終点ペアが非常に多く、乗り換えを考慮しなければならないノードは一部なので、このように分けて計算する。② は直通路線の探索で、⑤ は乗換回数 n 回の経路の探索である。③ と ⑦ は乗り換えが必要な経路を探す準備のために、乗換可能ノードから他のすべてのノードまでの経路を探すものである。

目的関数の計算は以上のように行いが、backward 法では一度に除くのは 1 路線だけなのですべての経路を求め直す必要はなく、その路線に関係する部分だけを修正する。

6. 運行回数決定モデル

路線網決定モデルで求めた路線網を構成する路線とそれらに含まれる路線に対し、このモデルで最適なバス運行回数を決める。定式化に先立ち、乗客の行動について次の仮定を設ける。

- ① 乗車経路は運行回数にかかわらず一定とする。
- ② 乗車経路は乗換回数が最小の経路の中で所要時間が最も短いものとする。
- ③ 乗り換えられる停留所がいくつかあるときは、最初の路線にできるだけ長く乗るものとする。
- ④ 複数の並行する路線が利用可能なとき、各路線に乗車する割合は運行回数に比例するものとする。
- ⑤ 停留所での平均待ち時間は利用できる路線の運行間隔の 1/2 とする。
- ⑥ 乗換時間は乗り換える停留所での待ち時間とする。

乗車経路は一定としているので乗車時間も変わらない。そこでシステム全体の目的関数の式 (1) のうち、ここでは待ち時間と乗換時間を最小化する。乗車経路と乗換停留所を固定し、⑥ の仮定を設けたので乗り換えを行うトリップは分割して扱うことができる。たとえば、 h で乗り換える ij 間のトリップは、 ih 間のトリップと hj 間のトリップに分ければよい。このような処理を行えば、トリップはすべて乗り換えを必要としないもの

だけにできる。そうすれば問題の定式化においては乗り換えを考慮する必要はなく、単に総待ち時間の最小化を目的関数としてよい。

制約は各路線、各区間の乗客数が輸送定員を上回らないことと、必要なバス台数が運行可能バス台数以下であることとする。定式化すれば次のようになる。

$$\min Z = \sum_i \sum_j \frac{q_{ij}}{2 \sum_k \delta_{ijk} y_k} \dots\dots\dots (23)$$

$$\text{s.t. } \sum_i \sum_j \frac{r_{ijkl} q_{ij}}{\sum_{k'} \delta_{ijk'} y_{k'}} \leq C \dots\dots\dots (24)$$

$$\sum_k a_k y_k \leq B \cdot T \dots\dots\dots (25)$$

$$y_k = 0, 1, 2, \dots \dots\dots (26)$$

ここに、

δ_{ijk} : ij 間の乗車経路に路線 k が含まれるとき 1, 含まれないとき 0 とする。

r_{ijkl} : ij 間の乗車経路に路線 k の区間 l が含まれるとき 1, 含まれないとき 0 とする。

y_k : 路線 k の運行回数

a_k : 路線 k の往復運行所要時間

B : 運行可能バス台数

T : バス運行時間

この問題は式 (24) の定員に関する制約式の数が非常に多くなるので、このまま解くことは容易ではない。しかし式 (24) は目的関数と似た形をしており、式 (24) の左辺の値を小さくすれば目的関数値も小さくなる。すなわち式 (24) は式 (25) のバス台数の制約に比べれば緩い制約である。そこで定員に関する制約を省いて解を求め、必要ならば再計算を行う方法で実用的には十分である。そうすれば問題は制約式がバス台数に関する 1 つだけの簡単なものになる。

式 (26) では運行回数は任意の正整数または 0 をとれるようにした。最適化するためにはこれでよいが、実際には乗客に便利なように運行間隔が 3 分、5 分、10 分というように決められることが多い。これに対応して、ここでも運行間隔がきれいのよい数字になるように決めることにする。そのため運行間隔と運行回数をたとえば表-1 のように、サービスレベルの関数として決めておき、各路線のサービスレベルを決定する問題に変形する。

解法は次のようにする。

- ① すべての路線のサービスレベルを最低の状態にする。

表-1 運行サービスレベルの例

サービスレベル	1	2	3	4	5	6	7	8	9
運行間隔(分)	2	3	4	5	6	10	12	15	20
運行回数(回/時間)	30	20	15	12	10	6	5	4	3

- ② 各路線について、その路線のサービスレベルを 1 段階上げたときの所要バス台数と総待ち時間を調べる。ただし、サービスレベルが最高になっていればそれ以上は上げない。

- ③ サービスレベルを 1 段階上げたとき所要バス台数が運行可能バス台数以下で、所要バス台数の増加量に対する総待ち時間の減少量の割合が最大の路線のサービスレベルを 1 段階上げ ② へもどる。どの路線のサービスレベルを上げて運行可能バス台数以上になるときは計算を打ち切る。

7. ケーススタディ

ここでは最適路線網構成システムを実際の路線網再編成問題に適用し、その実用性を示すとともに路線網最適化の効果を調べる。

(1) 路線網再編成問題の概要

対象とした問題は尼崎市内のバス路線網を再編成するものである。この地域の現在の営業キロは 104 km で、79 系統に平日 1971 本のバスが運行されている。より効率的な路線網にするために、次の各項目に従って路線網計画案を策定する。

- ① 不要な路線を整理し、路線数を減らす。
- ② 長い路線を減らす。
- ③ 必要なバス台数を減らす。
- ④ バスが運行される区間には十分な運行回数を確保する。
- ⑤ 乗客の所要時間ができるだけ長くならないようにする。

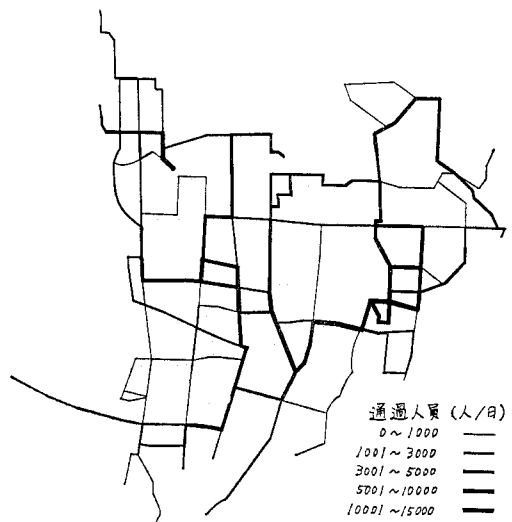


図-7 区間通過人員

需要交通量としては、昭和 50 年に乗客の流動調査で求められた停留所間 OD 表をそのまま使うことにする。現在の路線網での乗客の流れは 図-7 に示す。

(2) バス道路網の決定

少ないバス台数で運行回数を確保するため、バス道路網限定モデルを適用する。バスが運行可能な道路は 図-8 に示すとおりで、ノードは既存の停留所あるいはそれ以外の交差点を表す。このネットワークと、隣接停留所間を結んだ 図-9 の徒歩ネットワークをあわせて最大ネットワークとする。

バス道路網限定モデルによる計算の結果、バスネットワーク長と総所要時間の関係は 図-10 のようになっ

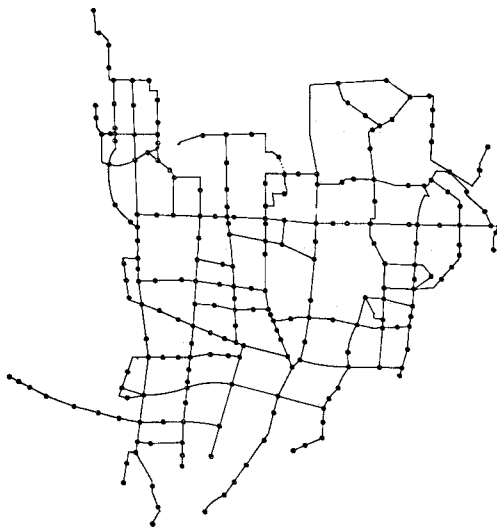


図-8 バス道路の最大ネットワーク

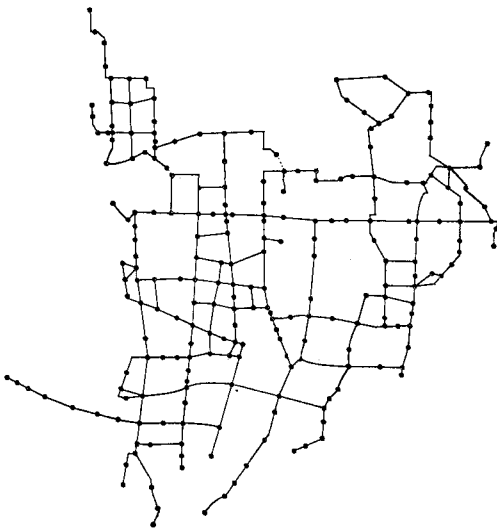


図-9 徒歩ネットワーク

た。ただし 図-10 のネットワーク長は現在のネットワーク長に対する割合で示してある。徒歩の 80 m/分 に対してバスの平均速度は 290 m/分 であることから総所要時間の増加は比較的小さく、ネットワーク長を現在の 70% にしても約 8% 増加するだけである。70% の場合のネットワークを例として 図-11 に示す。

後に続く路線列举モデル以降の各ステップでもネットワークが縮小される可能性があるので、ここではネットワーク長を現在の 80% に制約したときの解を採用する。そして方向転換できない停留所で行き止まりになっている箇所を修正し、 図-12 のようにバス道路網を定

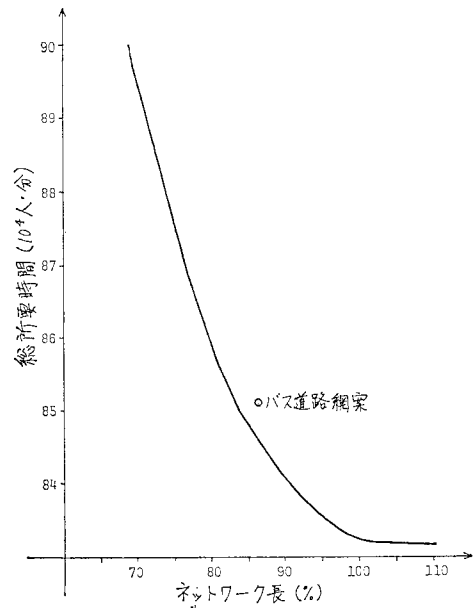


図-10 バス道路網限定モデルの計算結果

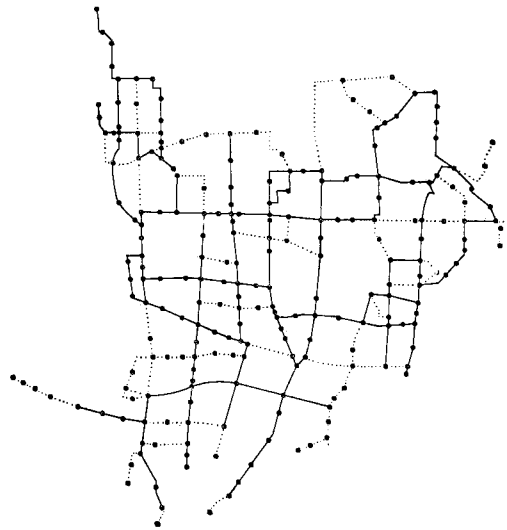


図-11 ネットワーク長を 70% にしたときの解

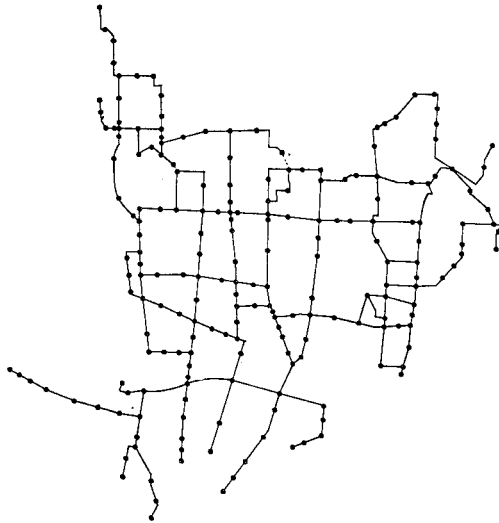


図-12 バス道路網案

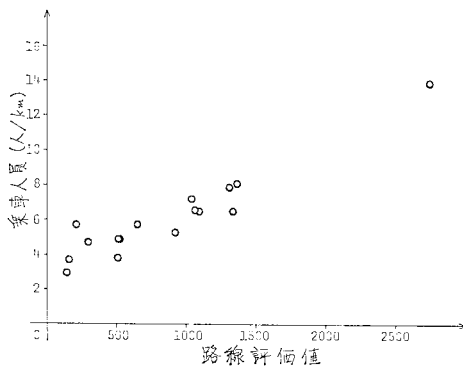


図-13 現路線の評価値と乗車人員の関係

める。このネットワークのバスリンクの長さの合計は 304.6 分で現在のネットワークの 86.2%、総所要時間は 850 898 人・分である。

(3) 検討路線の決定

路線列挙モデルを適用する前に路線評価関数の妥当性を検証する。図-8 の道路網で現在の各路線の路線評価値を計算すると、乗車人員の実績値との関係は 図-13 に示すようになる。この図では乗車人員の資料にあわせるために評価値を線別の値に集計している。評価値の計算においてはほかに路線はなく、路線上にトリップの起終点があれば必ずその路線を利用するとしていた。しかし 図-13 をみれば、多くの路線が存在する場合でも評価値の大きい路線の乗車人員は多く、式 (14) の評価関数で検討路線を決めることに問題はないと考えられる。

図-12 のネットワークではバスが方向転換できるノードは 27 ある。これらの組み合わせのうち、起終点間の最短所要時間が 25 分以下で、現在の路線の起終点か

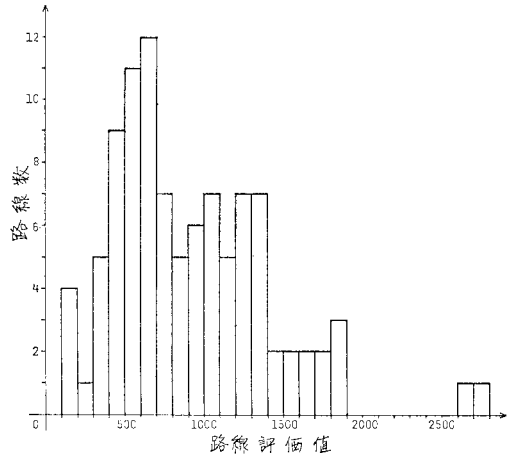


図-14 検討路線の路線評価値

あるいは OD 分布から検討の必要があると認められるものを選び、路線を列挙する起終点ペアとする。最短所要時間を 25 分以下とするのは長い路線を作らないためで、距離に直せば 7~8 km になる。

このようにして選んだのは 97 個の起終点ペアで、そのうちの 39 個が現在の路線に対応するものである。これらに路線列挙モデルを適用するときのパラメーターは次のようにする。

- ① 最長路線長は最短所要時間の 1.5 倍とし、最短所要時間が 10 分未満のときは最短所要時間に 5 分を加えたものとする。ただし循環路線では 30 分とする。
- ② 最長ループ長は循環路線を除き 5 分とする。
- ③ 極端に短い路線はないので最短路線長は制約しない。

これらの条件で路線を列挙し、評価値の大きさや他の路線との重複、区間乗客数を考慮して 61 個の起終点ペアの 99 路線を検討路線とした。検討路線の路線評価値の分布は 図-14 に示す。

(4) 路線網の決定

99 路線のうち他の検討路線に含まれるものを除き、70 路線に対して路線網決定モデルを適用する。パラメーターは乗換抵抗を 10 分、経路がないときのペナルティを 40 分、その最大値は約 1 000 トリップがバスを利用できない値である 80 000 人・分とする。ここでは時間帯によって路線網のパターンを変化させることはせず、全日の需要交通量を用いて路線網を決める。

計算の結果は 図-15 のようになった。ネットワークが異なるので正確な比較はできないが、最大ネットワークでも現在の路線網の目的関数値を約 5.6% 上回っている。これはバスを走らせる道路区間を限定したためであ

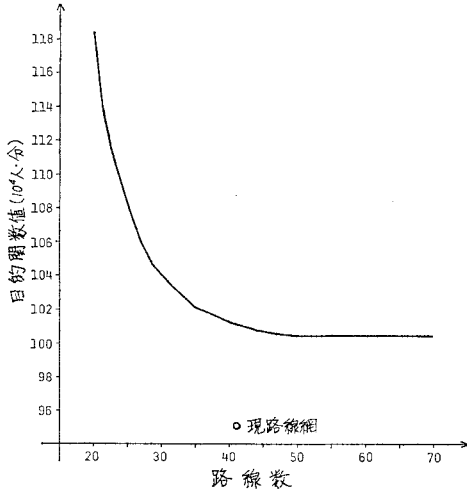


図-15 路線網決定モデルの計算結果

る。目的関数値があまり大きくならない範囲で路線を減らし、35 路線の路線網を採択する。この場合、目的関数値は現在より 7.4% 増加する。

(5) 運行回数の決定

採択した路線網を構成する路線とそれらに含まれる検討路線の合計 58 路線の運行間隔を決める。ここでは午前 7 時から 8 時 30 分までの朝のラッシュ時と、それ以外の時間帯に分けて計算する。運行サービスレベルは表-2, 3 のようにする。

計算結果はそれぞれ 図-16, 17 のようになった。

これよりバス台数を現在と同じにすれば、総待ち時間はラッシュ時で 1.1%、それ以外で 18.5%、全日では 16.6% 短くなる。路線を減らし、長大路線をなくしたので乗換回数が増加しているにもかかわらず、現在よりも待ち時間は短くなっている。これは運行回数の最適化の効果が大きいからで、現在の路線網において運行回数決定モデルを適用すれば、ラッシュ時で 31.0%、それ以外で 42.0% 総待ち時間が減少した。現在の路線網で現行の運行回数では乗車経路選択の仮定が実際と合わず、待ち時間の計算値が大きくなっていると考えられるが、迂回して乗車する時間を含んでいるとも解釈でき、すべて同一の仮定で経路を求めているので、これらと比

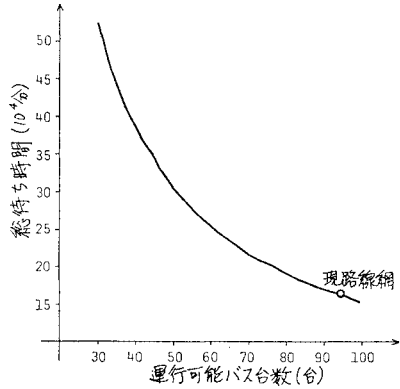


図-16 運行回数決定モデルの計算結果 (朝ラッシュ時)

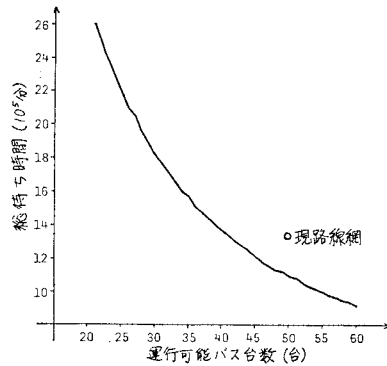


図-17 運行回数決定モデルの計算結果 (朝ラッシュ時以外)

較してもよいであろう。

計画案として運行可能バス台数を現在の 90% にしたときの解を採用すると、総待ち時間はラッシュ時で 10.2% 現在より長くなるが、ラッシュ時以外で 9.8%、全日では 7.6% 短くなる。また各路線の区間別乗車人員を調べた結果、輸送定員を大きく超えている区間はなかった。

(6) 計画路線網と現路線網との比較

現在の路線網と決定した路線網を主要路線で表せば、それぞれ 図-18, 19 のようになる。そして区間別の運行回数は 図-20, 21 のとおりである。この計画路線網

表-2 運行サービスレベル (朝ラッシュ時)

サービスレベル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
運行間隔 (分)	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	30	40	60	90	1000

表-3 運行サービスレベル (朝ラッシュ時以外)

サービスレベル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
運行間隔 (分)	5	6	8	10	12	15	20	30	40	60	90	120	180	240	1000

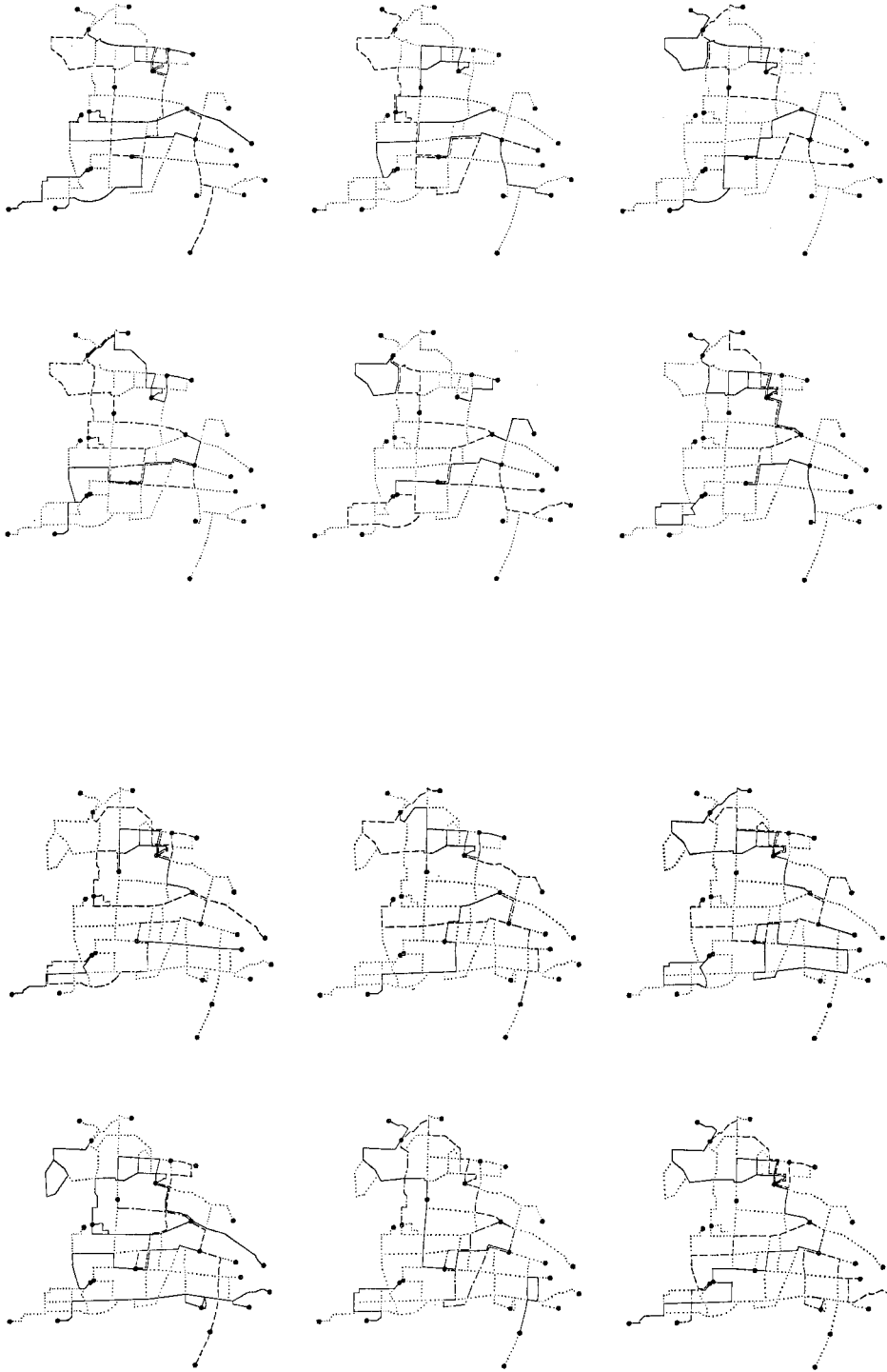


図-19 計画路線網

図-18 現路線網

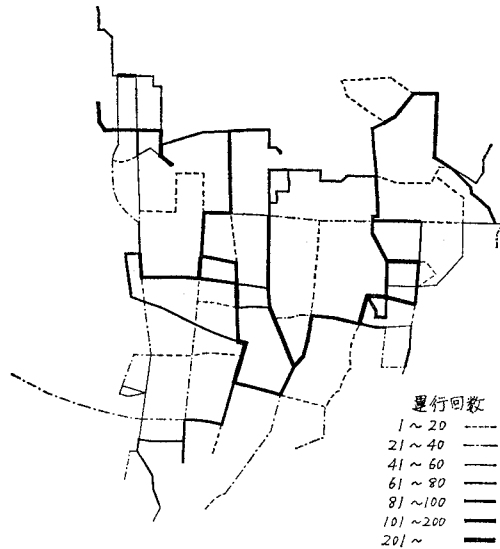


図-20 現路線網の区間別運行回数

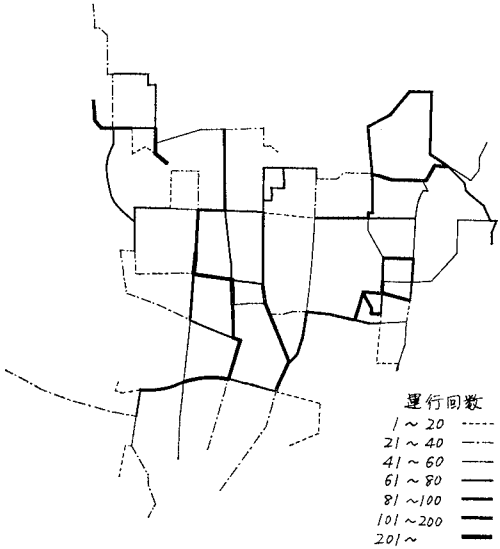


図-21 計画路線網の区間別運行回数

表-4 計画路線網と現路線網との比較

比較項目	現路線網	計画路線網
ネットワーク長	353.5 分	296.5 分
停留所数	209	184
路線数	76	44
所要バス台数	ラッシュ時 93.3 台 それ以外 49.5 台	ラッシュ時 83.9 台 それ以外 44.5 台
総運行回数	1971 回	1852 回
平均区間別運行回数	81.2 回	74.1 回
総乗換回数	8 回	10136 回
徒歩を要するトリップ	0	2944
平均所要時間	23.8 分	23.7 分
平均待ち時間	14.0 分	14.3 分

と現路線網とをいくつかの項目で比較すると、表-4 のようになる。

バス台数を減らしたために運行回数が減り、路線数を減らしたために乗換回数が増加したにもかかわらず、待ち時間はわずかしか長くなっていない。停留所がなくなり、他の近くの停留所まで歩かねばならないトリップは全体の3%になった。しかし、徒歩時間、待ち時間、乗車時間をすべて合計した平均所要時間は現路線網の値を0.1分下回っている。計画路線網は現路線網よりもネットワークは短く、路線数と所要バス台数も少ないが、利用者にとっては所要時間においてはほぼ同じである。

以上の結果から、(1)で上げた項目を満たす路線網計画案を作ることができたといえる。

なお、計算には京都大学大型計算機センターのFACOM M 190を使用した。計算時間のほとんどは、道路網限定モデルと路線網決定モデルに要した。道路網限定モデルはネットワーク規模だけでなく、対象とする個々のネットワークによって大幅に計算時間が変わる性質をもっている。路線網決定モデルは今回の場合、約220秒であった。また必要な記憶容量は路線網決定モデルが最大で、1536KBであった。ただし、これは使用する計算機にあわせて縮小することが可能である。

8. おわりに

バス路線の設定や運行回数の変更作業は、これまで計画者の経験と勘によって行われてきた。ここではそれらを合理的かつ容易に行うためのシステムを開発した。このシステムで決めるのは、路線網とそれを構成する路線の運行回数であるが、問題の複雑性からこれらを同時に決定するのは非常に困難である。そこで全体を部分的最適化問題に分割した。すなわち、バスに対する需要交通量とバス保有台数が与えられた条件のもとで、まずバスが走行する道路網を限定し、検討路線を列挙し、最適な路線網を求めた後、運行回数を決定するものとした。これに従い、対象地域内で路線の設置を検討する道路区間を決めるバス道路網限定モデル、路線評価関数の値の大きい路線を列挙する路線列挙モデル、総所要時間が短く、かつ乗換回数が少ない路線網を求める路線網決定モデル、待ち時間が短くなるように路線の運行回数を決める運行回数決定モデルのサブモデルによりシステムを構成した。

われわれは開発にあたっては理論の厳密性よりも実用性を重視したのであるが、ケーススタディとして尼崎市内のバス路線網を再編成する問題に適用し、実際の問題に十分適用可能であることを確信した。一般に本システムの適用に際しては、モデルの前提条件すなわちバス輸

送需要の情報がこのシステムに適用できる形の OD 表として与えられることなどが必要であることと、対象地域の特性を考慮しなければならないが、このシステムを用いることにより、バス路線網の決定を合理的、容易に行うことができると考える。

なおこの研究に際しては、尼崎市交通局から資料の提供などいろいろお世話になった。ここに厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

1) 枝村俊郎・宮本一夫：バス路線網の選定システム，第 11

- 回日本道路会議一般論文集，pp. 789～790，昭和 48 年。
- 2) 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。
- 3) 銭谷善信・天野光三・近東信明：都市内バス路線設定に関する一手法，土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集，第 4 部，pp. 7～8，昭和 53 年 9 月。
- 4) 枝村俊郎・森津秀夫：最適交通ネットワーク問題の厳密解法と近似解法，土木学会論文報告集，第 262 号，1977 年 6 月。
- 5) 枝村俊郎・森津秀夫：最適ネットワーク問題の地域交通網計画への応用，交通工学，第 12 巻，4 号，昭和 52 年 7 月。

(1979.3.5・受付)