

名古屋大学 正 員 河上 省吾
○名古屋大学 学主員 清江 章志

1. はじめに

バスの都市内交通機関としての特色は、路面交通であるために、需要の変化に応じて系統網や運行頻度、サービス条件を自由に変更できることであり、面時で高強度なサービスを提供できることである。しかし、従来、バス輸送計画の策定は、計画策定者の経験や勘にたよっており、特定系統の増設・廃止、運行頻度の調整にとどまっていた。しかも、その策定手法は、代替系統網、サービス水準、全手続日交通量を条件とし、対象地域全体に対して四段階推定法にのっとりバス分担交通量を推定した上で、各系統に利用需要を配分し、代替計画の評価を行なうという手法をとっていた。そのため、

①需要推定は、条件とした代替系統網とサービス水準に対して確定的に決定される。

②最終的な評価値から主観的に代替案の良否を判断せざるを得ず、最適化の見地が乏しい。

③経営状態やシビルミニマムの確保等の上位的な計画と、各系統のサービス水準決定等の下位的な計画との整合性がはかられている。

などの問題が生じている。また、一方では自動車交通需要の増大、鉄道路網の新設等により、バスのサービス水準が他機関に対して相対的に低下し、利用者が減少していく傾向が見られ、鉄道路網からバスサービス存続の危機に直面している都市が多くなっている。

従来から、数理計画手法やシミュレーション手法を用いて、バスの路線網や運行頻度を決定するすぐれたモデルが開発されてきている⁽¹⁾⁽²⁾が、それらは需要固定型であり、需要とサービス水準の相互作用を考慮して予測と設計を一貫させたバス輸送計画システムにはなっていない。

この報告では、料金水準・サービス水準・利用需要・系統網を決定変数として、利用者・経営者・計画策定者の三者の評価基準を導入し、対象地域全体での上位的な計画と、車庫区サフゾーンの下位計画との整

合性を保ちながら、バスシステム全体の計画を段階的に策定していくシステムを構成する方法について述べる。

2. 最適バスネットワーク問題と本研究の特徴

(1)最適バスネットワーク問題の構成

既存道路網に新規のリンクを建設したり、道路の拡張を行なう際に、ある評価基準に対して最適な代替案を求めることを最適ネットワーク問題^(以下はO.N.P.と記述)という。O.N.P.は、①ネットワーク均衡問題と②ネットワーク設計問題を含んでいる。①はいわゆる配分問題であり、マスト利用者があれば最短経路配分といった配分規範に従って問題が定式化される。一方、②は、①で求められた均衡交通量をもとにして、計画者が想定したシステム評価基準を最適化させるよう

な代替案を選択

する問題として定式化される。

つまり、O.N.P.

は以上の二つの問題がバタにな

っており、基本

時には①と②を

代替案の組みあ

わせ数に解き、

その中から最適

な代替案を求め

る作業である。

		バスネットワーク	道路ネットワーク
		・最短経路配分 ・観念系統では運行頻度の比で分組	・等時間原則配分
ネットワーク設計問題	配分手法	あり	なし
	決定変数	・バス系統網 ・系統の運行頻度	・設定リンク ・リンク規格
	リンク形状	・系統はリンク集合 ・異なる系統の同一リンクを共有可能	・リンクは個々独立
	制約条件	・系統別の各リンクの容量制約 ・総バス台数制約 ・総系統数制約	・予算制約
代替案	目的関数	・システム費用最小化 ・経営面からの評価基準	・総費用最小化
	代替案	・バス通過可能リンクのみをえ、系統網は代替案なしの状態から構成	・建設リンク、改良リンクをいくつかの代替案として与える

表-1

であるが、最適道路ネットワーク問題との間には表-1のような差異が存在する。このように、両者の間には、代替案の手え方、決定変数の性質、配分規範、リンクの考え方、システム評価基準等に実質的な面でのかなりの相違が見られ、最適バスネットワークを構成するためには、

その特徴を十分に考慮した解法を開発することが重要となる。

(2) 本研究の特徴

従来から、バス輸送計画に関する研究は数多く行われており、そのレビューは、矢野・銭谷²⁾によってなされている。これらの研究に共通している点は、

① 現在の輸送状況に対するバス利用実態から入手したOD表と計画の際にそのまま用いている。

② 計画の評価が、利用者・経営者、あるいは計画策定者の見地から単一の評価基準で行われており、さらに、ネットワーク均衡とネットワーク設計が同一の評価基準で最適化されている場合が多い。

③ 大都市における大規模バスネットワークに対する計画策定の際に、対象地域を一括して取扱っている。などの問題を含んでいる。

一方、P.T.S.にもとづく四段階推定法による行現レベルのバス輸送計画³⁾では、代替系統網を条件として需要推計や評価を行っているものが多く、最適化の見地からは不十分である。しかし、経営状態やサービスの公平性を左右するサービス水準、料金、需要推計等については、かなり深い考察が加えられており、①～③の問題点をある程度カバーしている。

大都市におけるバス輸送計画策定システムの一手法を検討した本研究は、

① 全域時バスサービス供給計画モデル(MODEL1)で、各車庫区内にあるセントロイドと結んだ簡略的なネットワークを対象にして、対象地域内全体の全手続OD表を用いて経営者の収支に関する条件を満足させながら、バス利用者の余剰が最大になるような料金水準とセントロイド間投入バス台数、それらのサービス水準に対応した各セントロイド間バス利用交通量を導びき、

② 車庫区内最適バス運行計画モデル(MODEL2)で、各バス停間にアレイフタウンされたOD交通量を用いて、各車庫区ごとに、バスの運行可能な道路網に対し、システム費用が最小になるような系統網と運行頻度を決定しようとするものである。図-1に、両モデルを取扱うネットワークとゾーンの概念図を示す。ここで、発生・集中点を表わすセントロイド以外に、地下鉄等の他機関への乗りかえノード、車庫区境界上のバス相互間の乗りかえノードを作る。そうすれば、車庫区間

トリップは複数の車庫区内トリップに分割されるから、全トリップが各車庫区内で完結し、MODEL1からMODEL2へのOD交通量と投入バス台数の整合性をとることができよう。え、マストラ相互の乗りかえも

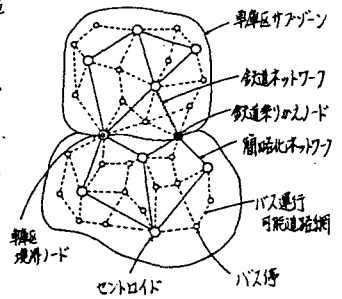


図-1

考慮でき、フィーチャーとして用いられるバストラップも取扱える。しかし、MODEL2で決定された系統網にOD交通量が配分された時の不効用（たとえば走行時間等）と、MODEL1で用いたそれとは一致しない。が、MODEL1へフィードバックを行なうことによって、その修正をすることが可能と思われる。以上のように、両モデルを統合して解を求めるこの考え方は、目的関数の最適化の実行順序が指示された排書式最適化の近似的な解法とみることができよう。図-2にモデルの全体構成を示す。

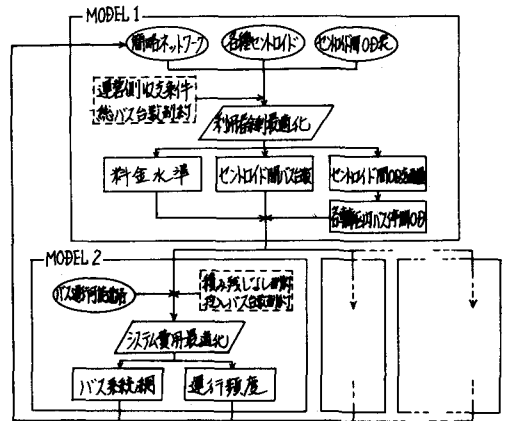


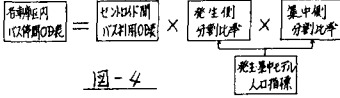
図-2

3. 全域時バスサービス供給計画モデル(MODEL1)⁵⁾

(1) MODEL1の概要とその定式化

MODEL1は、対象地域内全域に存在するセントロイド（収集点）ノード、鉄道駅、車庫区境界地点）間の全手続OD交通量、簡略化ネットワーク、対象地域内投入可能総バス台数が既知であるとき、上位計画時の決定要因である料金水準、サービス水準、それらに対応したOD間バス利用需要を同時決定するモデルである。このモデルは、経営者からの収支条件のもとで、利用者余剰最大化を最適化基準として、交通施設の最適規模と利用料金の

需要と、重カ型分布モデルの考え方に従ってバス停間のOD交通量にアレイファウンする。その望みは、発生側と集中側の人口指標とし、図-4



4. 車庫区内最適バス運行計画 (MODEL 2)

(1) MODEL 2 の概要とその定式化

前述のモデルでは、車庫区内でのセントロイド間バス利用OD交通量からアレイファウンされたバス停間のOD交通量、セントロイド間投入バス台数、料金水準とが決定された。これらのうち、投入バス台数は、本モデルの投入バス台数制約条件となり、バス停間OD交通量と料金水準は既知の入力となるものである。ここで取扱うMODEL 2は、車庫区単位の系統網とその運行頻度の詳細なバス運行計画の最適化を行なうことを目的としている。モデル作成に当って、

① バス利用OD交通量は、MODEL 1 の出力を用い、本モデル内では系統網、運行頻度等のサービス水準の変化による変動はない。

② しかし、乗車経路は、系統網、運行頻度の変化により、ある規範に従って変動する。という前提条件を設ける。②の条件は、近くに目的地までの乗車時間が最短の経路があっても、徒歩でその他のバス停まで行って、異なる系統に乗車した方が、運行頻度がたいために総所要時間が短い場合があることを認めることを意味している。

以下に、ある代替系統網集合 K が与えられ、その系統上の運行頻度が β_k ($k=1, 2, \dots, K$) で表わされる場合のバスネットワーク問題の定式化を、バスネットワーク均衡問題、バスネットワーク設計問題の順に行なう。尚、ここで用いているバス利用OD交通量 S_{ml} は、後述する変換を行なった後、全OD交通量がいずれか一つの系統によって処理できるものになった後のOD交通量を表わしている。

α) バスネットワーク均衡問題

バス利用者は、以下の乗車規模にのっとってバス系統 k を選択するものと仮定する。

① 門チのバス系統網と運行頻度のうちで、所要時間が最小となる系統を選択する。

② 同一経路に複数の系統が並行して設定されている

場合には、運行頻度に比例してそれぞれの系統を利用する。

以上の仮定のもとに、バスネットワーク均衡問題は次のように定式化される。ある特定のODペア ml についての最短経路 γ_{ml}^* は、ODペア ml 間のバス集合 R_{ml} に対して

$$\gamma_{ml}^* = \{ \gamma_{ml} \mid \min_{\gamma_{ml} \in R_{ml}} \sum_{ij} \delta_{r_{ij}}^{\gamma_{ml}} \gamma_{r_{ij}}^* t_{ij}^* \} \quad (8)$$

であり、系統 k のリンク ij 間バス利用交通量 f_{ij}^k は次のように表わされる。

$$f_{ij}^k = \sum_{ml} \sum_{\gamma_{ml}^*} \delta_{r_{ij}}^{\gamma_{ml}^*} \gamma_{r_{ij}}^* \frac{\beta_k}{\sum_{k \in K_{ml}} \beta_k} S_{ml} \quad (9)$$

ここに、 $\delta_{r_{ij}}^{\gamma_{ml}^*}$ はODペア ml の最短経路 γ^* に ij リンクが含まれる時1、その他の時0、 $\gamma_{r_{ij}}^*$ はODペア ml の最短経路 γ^* に系統 k が含まれる時1、その他の時0、 β_k は系統 k の運行頻度、 K_{ml} はODペア ml 間競合系統集合である。同様にして、ODペア ml の交通量のうち系統 k を利用する利用者数 f_{ml}^k は次式で表わされる。

$$f_{ml}^k = \gamma_{r_{ij}}^* \frac{\beta_k}{\sum_{k \in K_{ml}} \beta_k} S_{ml} \quad (10)$$

β) バスネットワーク設計問題

α) で求められたリンク負荷量に対するシステム内の総不効用を最小にするような代替案を採用するという評価基準を想定するとき、バスネットワーク設計問題は、

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{ij} f_{ij}^k U_{ij}^k \rightarrow \min \quad (11)$$

$$\text{s.t. } a \cdot \beta_k \geq f_{ij}^k \quad ij \in N_k, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \beta_k / (T / \frac{2L_k}{V_k}) \leq Q \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K_{ml}} \beta_k = Q_{ml} \quad (14)$$

ここに、 a はバス定員、 Q は単位ゾーン内に投入可能なバス台数、 Q_{ml} はMODEL 1 で求めた ml セントロイド間に必要な投入バス台数、 T は計画対象時間を表わしている。制約条件(12)は、各系統内のいずれのリンクでも積み残しを認めないという条件であり、(13)、(14)はそれぞれ、車庫区内、セントロイド間の投入バスの頻度の条件を考慮している。その他に、総走行台距離、総走行台数等の制約も考えられるが、系統網の再編という意味から、それらの限界値を指定するのは困難であると考えられるため、ここでは採用しない。評価関数(11)における不効用 U_{ij}^k は、時間費用、走行コスト、運賃費用等を含むシステム評価

関数を想定しており、それらは、系統の有無、運行頻度の非線形関数となるため、バスネットワーク設計問題は制約条件付きの非線形整数計画問題となる。

(2) MODEL 2 の解法

前節で定式化された問題は、ある系統網とその系統の運行頻度をパラメトリックに変えながらネットワーク均衡問題を解き、その結果を用いてネットワーク設計問題を解く一つのパラメトリック非線形計画問題である。この問題における決定変数は、ある系統の経路とその運行頻度であり、その解法は非常に困難である。そこで、以下に示すように、系統の列挙と運行頻度の決定という2つのサブモデルに分け、列挙された系統の要・不要とその運行頻度を別々に解く。

① 探索対象系統列挙モデル

バスネットワーク問題は、ある評価基準を最適化する系統網とその上を走るバスの運行頻度を決定する問題であるが、実行可能な系統網の数は膨大である。しかし、実際の系統は、物理的・管理的な面から、その形状や性質に対して種々の制約を受ける。そこで、佐村・森津らの路線列挙モデル¹⁷⁾を用いて、

① 系統長さ条件；系統の長さをある範囲におさえ、長過ぎたり短か過ぎたりする系統を作らない。

② 系統形状・迂回率条件；幾重ものループや折返しを持つ系統を作らず、さらに、乗客に不安を与えるような遠回りや避けるため、バス停間最短経路の α 倍以上の経路は認めない。

③ 系統の両端は、回転可能なターミナルだけとする。等の制約を満足する系統をすべて列挙し、これらを探索対象系統集合 K とする。この問題は、ある条件のもとでのリンフの順列を作る問題で、組みめめセツリーを使う帰納的列挙法を用いて解くことができる。探索系統集合 K を作成した段階で、代替案なしのバスネットワーク問題が、一部代替案集合 K を持つ問題に変換されたが、①～③の条件をゆるめることによって、真に代替案なしのバスネットワーク問題に近付けることも可能である。

② 系統網・運行頻度決定モデル

このモデルは、列挙された探索系統集合 K のうち、 n 系統は必要か、必要であれば運行頻度 g_n を何卒にすれば良いかを、システム費用最適化基準で決定するこ

とを目的とする。ここで、システム費用とは、バス輸送を提供、享受するに当って、利用者と経営者がシステムへ支払う総費用を意味する。本モデルでは、

$$\text{システム費用} = \text{時間費用} + \text{経営費用}$$

と定義し、システム費用最小化問題として定式化すると評価関数は

$$F(g) = \bar{w} \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{j \in L_k} \bar{f}_{ij}^k(g) \cdot t_{ij}^k + \bar{f}_i^k(g) \cdot t_{is}^k + \bar{f}_s^k(g) \cdot t_{si}^k \right\} + C \sum_{k=1}^K g_k L_k \quad (15)$$

となる。ここで、 $\bar{f}_{ij}^k(g)$ ；運行頻度が g の場合の n 系統 j リンフ乗客数、 $\bar{f}_i^k(g)$ 、 $\bar{f}_s^k(g)$ ；それぞれ第1トリップ、第2トリップ以降で n 系統を利用する乗客数、 t_{ij}^k ； n 系統 j リンフ乗車時間（ $g_k=0$ のときは徒歩時間）、 t_{is}^k ； n 系統の平均待ち時間、 t_{si}^k ； n 系統への平均乗り換え時間、 $\bar{w}$ ；バス利用者の平均時間評価値、 L_k ； n 系統の系統長である。さらに、従来する0日表変換操作により乗り換えなしの新しい0日交通量 S_{nd} に変換すると、式(15)は次のようになる。

$$F(g) = \bar{w} \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{j \in L_k} \bar{f}_{ij}^k(g) \cdot t_{ij}^k + \bar{f}_i^k(g) \cdot t_{is}^k \right\} + C \sum_{k=1}^K g_k L_k \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで} \quad \bar{f}_i^k(g) &= \sum_{j \in L_k} \gamma_{ij}^k \frac{g_k}{\sum_{j \in L_k} g_{kj}} S_{nd} \\ t_{is}^k(g) &= \frac{1}{2} \frac{60}{g_k} \end{aligned} \quad (17) \quad (18)$$

この評価関数を(15)、(16)、(17)のもとに最小化すればよい。解法には、バスネットワーク問題の特徴から、解の厳密性よりも、

① ネットワーク均衡問題を解く。

② 運行頻度 g は整数値とすることが必要である。

③ 若干の運行頻度の変化による、乗車経路や評価関数値の大幅な変動はないと思われる。

④ 計画決定者の判断による主観的な計画調整が可能となるような段階的操作性があることが望ましい。

等の条件を満足することが重要であると考え、直接探索法の一解法である Hooke-Jeeves の方法を応用する。この方法は、探索ステップ幅 Δg_k を任意に決定でき、各系統の運行頻度の最適解への増減パターン決定と、そのパターン変動ベクトルを各段階ごとに求めるという特徴がある。解法のフローを図-5に示す。ここで、初期値としては第1回目の $\bar{f}_{ij}^k$ ($k=1, \dots, K$) に対して $\lceil \max_{j \in L_k} (\bar{f}_{ij}^k/a) \rceil + 1$ なる整数ベクトル $g^0 = (g_1^0, g_2^0, \dots, g_K^0)$ とすることにより、代替案の組みめめセツ数を相当数、減少させることができ

る。ステップ幅は、評価関数値の改善が見られる間は2以上の整数値をとり、改善の幅が小さくなった時点で1つ前の基点にもどり、それ以前より小さい整数値を採用し、最終的には1とする。

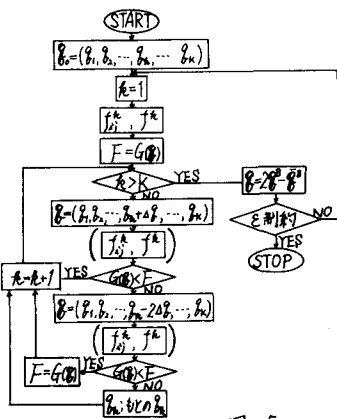


図-5

する。パターン決定の順序は、本来、境界効用値の最大な系統から変化させるべきであるが、ここでは右ステップで乱数を発生させて、ランダムにその順序を決めることにする。

(c) MOBEL 2 の解決のフロー

以上を示した MOBEL 2 を解く手順を 図-6 に示す。

各レベルについて説明する。(a) 探索対象系統列等モデルで判考された系統網は、一つのリンクに複数の系統が対応している場合があるが、この状態ではルートサーチが困難であるため、図-7 のように乗りかえノード、乗りかえリンク、待ち時間リンクを自動的に作成し、ラベリングを行ない新ネットワークを再編する。次に、(b) 新ネットワークを用いて右バス停間の最短経路を探索する。(c) 各OD間の最短経路の中には、乗りかえを必要とするトリ

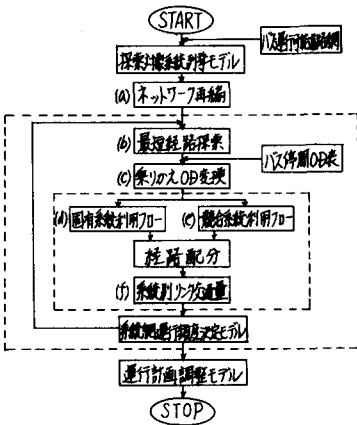


図-6

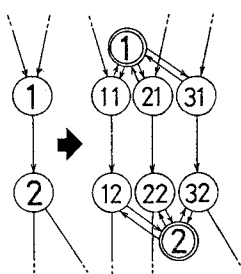


図-7

えノード、乗りかえリンク、待ち時間リンクを自動的に作成し、ラベリングを行ない新ネットワークを再編する。次に、(b) 新ネットワークを用いて右バス停間の最短経路を探索する。(c) 各OD間の最短経路の中には、乗りかえを必要とするトリ

ップが存在する場合があるが、それらのトリップは、乗りかえ前のトリップと乗りかえ後のトリップとに分割し、すべてのOD交通量を乗りかえなしのトリップと分割する。この変換により、式(46)に示したように、 S_{mk} の乗車時間と待ち時間との和が所要時間となる。(d) ネットワーク均衡問題の対象となるODペアは、固有系統利用ODペアと競合系統利用ODペアとに分離できる⁶⁾。固有系統利用ODペアとは、単一の系統しか利用できないODペアであり、その候補となるための条件は、ネットワークを有向グラフで表わした時、(i) 単一系統のみが存在するリンク集合 I_k を構成するノード間ODペアと、(ii) I_k の始点ノードと、それよりも後方に存在するリンクの終点ノードとのペアと、(iii) (i), (ii)の逆方向のODペアとである。これらのODペアは、インシデンスマトリックス $A = \{a_{ij}\}$ (ここに i は系統、 j は通過リンク)を用いると、 $J = \{j \mid \sum_{i=1}^J a_{ij} = 1\}$ となるリンク集合 J に対して、 $K_{cap} = \{k \mid j \in N_k, J = \{j\}, N_k \text{ は系統を構成するリンク集合} \}$ なる固有系統 K_{cap} を求めた後に、 $M^k = \{(m, l) \mid m \in J^k, l \in J^k, k \in K_{cap}; J^k, (J^k) \text{ は } k \in K_{cap} \text{ なる系統中のリンク集合 } J^k \text{ 以前(以後)に存在するノード集合} \}$ で表わされるODペア集合 $M^k (k=1, \dots, K_{cap})$ により、すべて求めることができる。(e) 競合系統利用のODペアは、固有系統利用ODペア以外のODペアであり、このOD交通量だけを運行頻度按比例して競合系統に配分すればよい。つまり、サービス水準の変動に伴って利用系統が変化する際に、その対象となるODペアは、競合系統利用OD交通量だけになる。このようなODペアの分割は、都心周辺部の鉄道駅から放射状に系統が設定され、系統相互の競合が少ないネットワークでは、ネットワーク均衡解を求める際の計算上、非常に有効となる。(f) (d), (e)で分離配分した右フローの合計から系統別リンク交通量 f_{ij}^k を求める。という手順でネットワーク均衡問題を解く。この操作と前述のHooke-Jeevesの方法の間に組み込み、系統網・運行頻度決定モデルの評価関数がと制約のもとで収束するまで計算をくり返す。

5. おわりに

本研究は、従来のバス輸送計画決定システムに対して、P.T.調査から入手できるセントロイド間OD表と既存道路網が手付である場合に、

①対象地域全体に対して、利用者と経営者側の評価基

準を導入した最適セントロイド間バス投入台数、料金水準、顕在化バス利用の日交通量を求め、次に

④ これらを決定変数や制約条件として、車庫区サフゾーンごとに、系統網と各系統上の運行頻度をシステム費用最小化の評価基準を用いて求める。

という、バス輸送計画の一貫した策定システムの開発を行った。

本来、視認の評価基準をもつ最適化問題は、多目的計画として定式化され、種々の手法で求解が可能であり、決定変数の間には、その解法に応じた正確な整合性が保たれる。本手法も、MODEL 1 と MODEL 2 とで取扱うネットワークが同一のものである場合には、正規の手法で求解できるはずであるが、定式化の困難さや非線形性等の制約のため、2段階のモデルとして定式化し、サフゾーンでモデルを開くことにより、近似的に決定変数の整合性を保つようにしている。しかし、簡略化ネットワークと MODEL 2 で決定されるネットワークの統合化、両モデルの厳密解法等の問題点がある。今後、これらの問題点を解決していくと同時に、モデルの実際問題への適用の有効性を検証していく必要がある。

参考文献

- ① 役村俊郎・森澤孝夫・松田宏・土井元治：最適バス路線網構成システム，工不学会論文報告集，第300号，pp 95~107，1980年8月
- ② 天野光三・飯谷善信・近東信明：都市街路網におけるバス系統の施設計画モデルに関する研究，工不学会論文報告集，第325号，pp 143~154，1982年9月
- ③ 石巻屋市：バス交通計画調査報告書（路面公共交通計画調査），1982年3月
- ④ 山田浩之：都市高速道路の最適規模と料金水準，高速道路と自動車，Vol. XVI, No. 9, 1968
- ⑤ 河上省吾・溝上尊志：需要の変動を考慮したバスサービス供給の最適化，工不学会中部支部研究発表会概要集，pp 264~265，1982年2月
- ⑥ 飯田恭範：都市高速道路の最適規模決定法，高速道路と自動車，Vol. XVII, No. 11, 1969
- ⑦ 河上省吾・溝上尊志：最適バス運行計画策定システムに関する基礎的検討，第6回交通工学研究発表会論文集，1982年11月
- ⑧ Anthony F. Hax and Nigel H. M. Wilson : The Allocation of Buses in Heavily Utilized Networks with Overlapping Routes, Transp. Res.-B Vol. 16B, No. 3, pp 221~232, 1982