

# 都市交通システムの最適設計

(第71回月例講演会)

月尾嘉男

## 1. 背景

都市計画は工学の分野に分類されることが多いが、他の工学の分野と異なって客観的な処理が可能な作業の占める割合は比較的少なく、かなりの部分は主観的な作業にゆだねられることが多い。その中でも交通に関連する計画は客観的な作業の比率が高く、これまでもさまざまなオペレーションズ・リサーチの手法の対象となってきた。しかし、これも本格的に取り組まれはじめたのは1960年前後のシカゴを対象にした交通研究あたりからで、それほど古いことではない。そしてこの研究がアメリカを中心に発展したという経緯もあって、これまでの主要な研究分野は自動車の交通を対象にしたものである。すなわち、各個人が各個人の意志に従って時間的にも空間的にも自由に移動するという現象を前提にしてその処理を考えるということが交通計画の基本になっていた。しかし、この時間的・空間的自由という特徴のために、特定の時刻に特定の場所に自動車が集まって交通混雑をひき起すという問題や、このような交通手段を利用できない「交通貧困層」に対する対策という問題が、社会で次第に大きな比重を占めるようになり、一方で通信・制御技術の進歩の影響も受け、交通手段に新しい概念が生じてきた。

ある対象地域内を移動しているすべての車両の状態を1箇所もしくは数箇所を集めて知り、その情報に従って各車両の移動を制御しようという考え方である。その最初の段階は「広域信号制御」とよばれる方式で、各車両の移動の状態を知り、これまで独立に点滅していた交通信号を系統的に点滅させて、その地域の車両の移動量をより大きくしようとするものである。これはさらに進んで「総合交通管制」になり、移動の指示を走行中の各車両に個別に送り、各車両がより早く移動できるようにするという方式である。さらに革新的な方法として、すべての車両を専用の軌道上を走らせることによって、その移動を完全に制御しようとする技術も開発された。

「自動軌道交通機関」(Automated Guideway Transit System)とよばれるこの方式では、すべての車両の状態を絶えず把握している制御システムが、各車両の運行を完全に制御することを可能にするものである。

これまでの交通計画の一般的な方法は、ある対象地域の交通需要を推計し、それに対して特定の交通手段の計画代替案をいくつか作成し、その結果を比較検討してみるというものであるが、上述のような新しい概念が出てくるといくつかの不都合が明らかになってくる。その最大の点は、これまでは道路のような施設のみを計画すればよかったが、新しい概念ではその運行についても計画する必要があることである。

以上のような諸条件を背景にして、ある計画対象地域の全体的な交通需要が与えられたとき、導入される新しい交通手段はどのような施設をもち、どのような運行をなされるのが最適かを求める方法を検討したのが本報告の内容である。

## 2. 理論

全体としては利用者の立場からみた最適な交通手段の仕様を求めるという目的で、一般的な最適化の方法と同様に、交通手段が提供するサービスを評価する目的関数を設定し、それが各種の制約条件の中で最適値をとる仕様の組合せを求めるという作業を行なっている。

### 2.1 目的関数

利用者の立場から交通手段を評価するための項目は多数あるが、代表的なものとして以下の4項目をとりあげ、相互に共通の単位に価値換算が可能であるという前提で式(1)のような関数としている。項目は利用者が出発点から最寄の駅までゆくの要する時間と、到着駅から目的地までゆくの要する時間を合わせたアクセス時間の平均値( $A^*$ )、駅で車両の到着を待つ待時間の平均値( $W^*$ )、車両に乗って移動する時間の平均値( $R^*$ )、支払う料金( $C^*$ )で、

$$F = \alpha_A A^* + \alpha_W W^* + \alpha_R R^* + \alpha_C C^* \quad (1)$$

$\alpha_A, \alpha_W, \alpha_R, \alpha_C$ : 換算のための係数

を目的関数とする。

## 2.2 制約条件

制約条件は大別して3種類あり、第1は経営上の制約条件で、ある期間の収入( $I$ )と支出( $E$ )との間に

$$I \geq E \quad (2)$$

が成立すること。第2は交通手段が提供するサービスの制約条件で、各個別の移動のアクセス時間( $a$ )、待時間( $w$ )、基準となる交通手段(たとえば自動車)との移動時間比( $\pi$ )、移動費用( $c$ )が、ある基準  $\hat{a}, \hat{w}, \hat{\pi}, \hat{c}$  を越えず、またその平均値もある基準  $\hat{A}, \hat{W}, \hat{\pi}, \hat{c}$  を越えないということ、

$$a \leq \hat{a}, w \leq \hat{w}, \pi \leq \hat{\pi}, c \leq \hat{c} \quad (3)$$

$$A^* \leq \hat{A}, W^* \leq \hat{W}, \pi \leq \hat{\pi}, c \leq \hat{c} \quad (4)$$

と表わされる。第3は技術的制約条件で、求められた各仕様が技術的に実現可能なものであるかの判断である。

## 2.3 仕様

交通機関の仕様としては、それらによって具体的なハードウェアが想定できるという前提からつぎの6項目を基本的に求める：(1)駅の位置、(2)路線の配置、(3)車両の定員、(4)車両の最高速度、(5)車両の運行間隔、(6)料金。もちろんこれから派生的に求まる仕様は多い。

## 2.4 モデル

モデルは6種類のサブ・モデルから成り、最初の2種類が交通手段の施設に関するもの、つぎの2種類が交通手段の運営に関するもの、最後の2種類が評価に関するものである。

### 2.4.1 ステーション・サブ・モデル

このモデルでは駅の位置を、アクセス時間の制約条件を満たすような形で求める。最初、アクセス時間の制約条件を満たす最小の駅を配置して、順次増やしていく過程をたどる。この最小の駅の配置は解析的に求めることも可能であるが、現実の都市では駅の位置には制約があるので、むしろ人間・機械応答方式で求めたほうがよく、本モデルもその方式にしている。

### 2.4.2 ガイドウェイ・サブ・モデル

求められた駅の配置に対して、その間を結ぶガイドウェイを求める。最適のガイドウェイ網は、グラフ理論でいう、ミニマス・スパニング・ツリーと完全グラフの間に存在していることは明らかであるので、まずミニマス・スパニング・ツリーを求め、移動時間の制約条件を最小限満たすまで順次リンクを加えてゆき、その最小限のガイドウェイ網から計算を出発させる。

### 2.4.3 デマンド・サブ・モデル

対象地域全体の交通需要と競合している交通手段のサ

ービス条件が与えられているという前提で、一般にモーダル・スプリット・モデルといわれる、全体の交通需要から対象交通手段がどれだけ受けもつかを求める式によって求める。その式も多様であるが、ここでは多数の交通手段を同時に扱うのが容易な式(5)とした。

$$(t_{ij})_m = \frac{\exp(-y_{ij})_m}{\sum_{k=1}^M \exp(-y_{ij})_k} \cdot t_{ij} \quad (5)$$

$$y_{ij} = \gamma_a \cdot a_{ij} + \gamma_w \cdot w_{ij} + \gamma_t \cdot t_{ij} + \gamma_c \cdot c_{ij} + \gamma_0 \quad (6)$$

$M$ は交通手段の数、 $m$ は特定の $m$ 番目の交通手段、 $t_{ij}$ は $i$ 駅 $j$ 駅間の交通需要、 $a_{ij}$ 、 $w_{ij}$ 、 $r_{ij}$ 、 $c_{ij}$ はそれぞれ $i$ 駅 $j$ 駅間の移動に関するアクセス時間、待時間、移動時間、料金、 $\gamma_a$ 、 $\gamma_w$ 、 $\gamma_t$ 、 $\gamma_c$ 、 $\gamma_0$ は回帰分析から得られる係数である。

### 2.4.4 ヴェイクル・サブ・モデル

これは車両の移動を記述するモデルであり、各駅での車両サービス率( $\mu_k$ )と需要の到着率( $\lambda_k$ )の関係を記述する部分と、軌道上を走行している車両の状態を記述する部分とからなっている。前者は待行列理論の応用であるが、交通手段の場合、系の中に車両と乗客とが存在し、車両についてはひとつの処理が終了しても系から出ることなく、再び系の中で利用されるという特徴があるので少し変形を行なっている。結果のみを示すと、

$$\frac{d}{dt} Q_k(t) = \left( \lambda_k \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & & & \\ 0 & \dots & & \\ \vdots & & & \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 10 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & \\ \vdots & & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & & & \end{pmatrix} \right) Q_k(t) - \mu_k \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & & & \\ \vdots & & & & \\ \vdots & & & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \\ \vdots & & & & \end{pmatrix} Q_k(t) \quad (7)$$

$$Q_k(t) = (q_{k,0}(t), q_{k,1}(t), q_{k,2}(t), \dots, q_{k,i}, \dots)^T \quad (8)$$

という関係が得られる。 $\lambda_k$ は $k$ 駅での利用者の到着率、 $\mu_k$ は車両のサービス率、 $q_{k,i}(t)$ は $t$ 時刻に $i$ 人の待ちがある確率である。軌道上の車両についての状態も主要な関係式のみを示すと、

$$\sum_{i=1}^{N_s} f_{ki}(t) = \sum_{j=1}^{N_s} f_{jk} \left( t - \frac{l_{jk}}{(V_{avr})_{jk}} \right) \quad (9)$$

$$\mu_k = \sum_{i=1}^{N_s} f_{ki}(t) \quad (10)$$

となり、 $f_{ij}(t)$ は $t$ 時刻に $j$ 駅から $i$ 駅に到着する車両台数、 $N_s$ は駅数、 $l_{ij}$ は $i$ 駅 $j$ 駅間距離、 $(V_{avr})_{ij}$ は

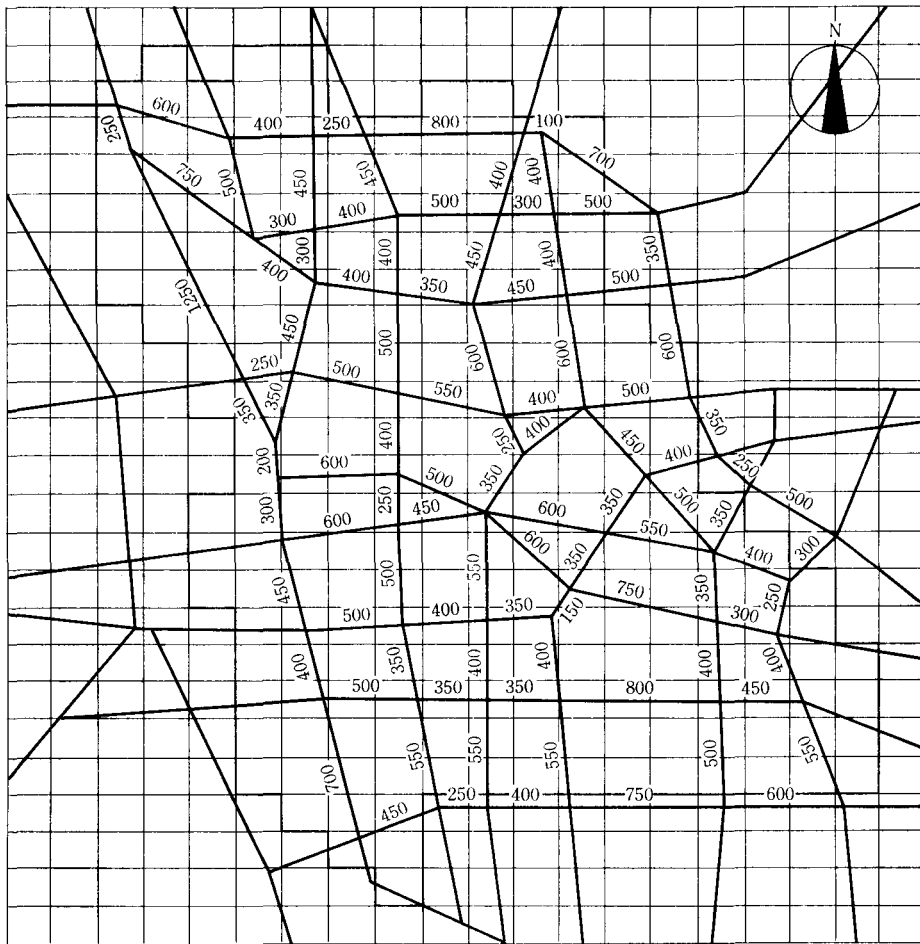


図 1 計画対象地域の道路ネットワーク(1985) 単位m(1目盛220m×180m)

$i$  駅  $j$  駅間の車両の平均速度である。また式(9)(10)と式(7)(8)を結びつける関係として、

$$\lambda_k = (1 - q_{k,0}(t)) N_k \quad (11)$$

が想定される。

#### 2.4.5 コスト・サブ・モデル

以上4種類のサブ・モデルによって、交通手段のある施設の状態とある運行の状態が仮定された後に、その運営に要する費用をこのモデルによって求める。ここでは運営費用は建設費用の償却費用、施設の保守・管理费用、電力、人件費などの純粋な運転費用から構成されており、それらの合計が料金収入より少ないかどうかを判定する。

#### 2.4.6 サービス・サブ・モデル

同じく前述の状態について、そこで提供される輸送サービスの状態を求め、各サービスの制約条件を満たしているかを判定する。

## 2.5 最適化の方法

これは多変数の同時決定問題であるが、施設のある状態を先に定め、その中で運行に関する変数を変化させてひとつの最適な状態を求め、つぎに順次施設の状態を変えて同様のことを繰り返し、全体としての最適になる変数の組合せを求めるという方法をとっている。施設については、各制約条件を満たす最小の駅配置、最小の路線延長から出発し、順次増加させていく。

## 3. 応用

以上のモデル構成について、具体的な計算を群馬県前橋市を対象に行なってみた。対象地域は図1に示すような道路網をもつ市街地で、この中に自動車、タクシー、バス、2輪車、徒歩という交通手段があり、そこに新しく自動軌道交通機関を導入する場合を扱った。自動軌道交通機関には大別すると、現在のバスを自動運行するような中量軌道輸送機関(Group Rapid Transit)と、

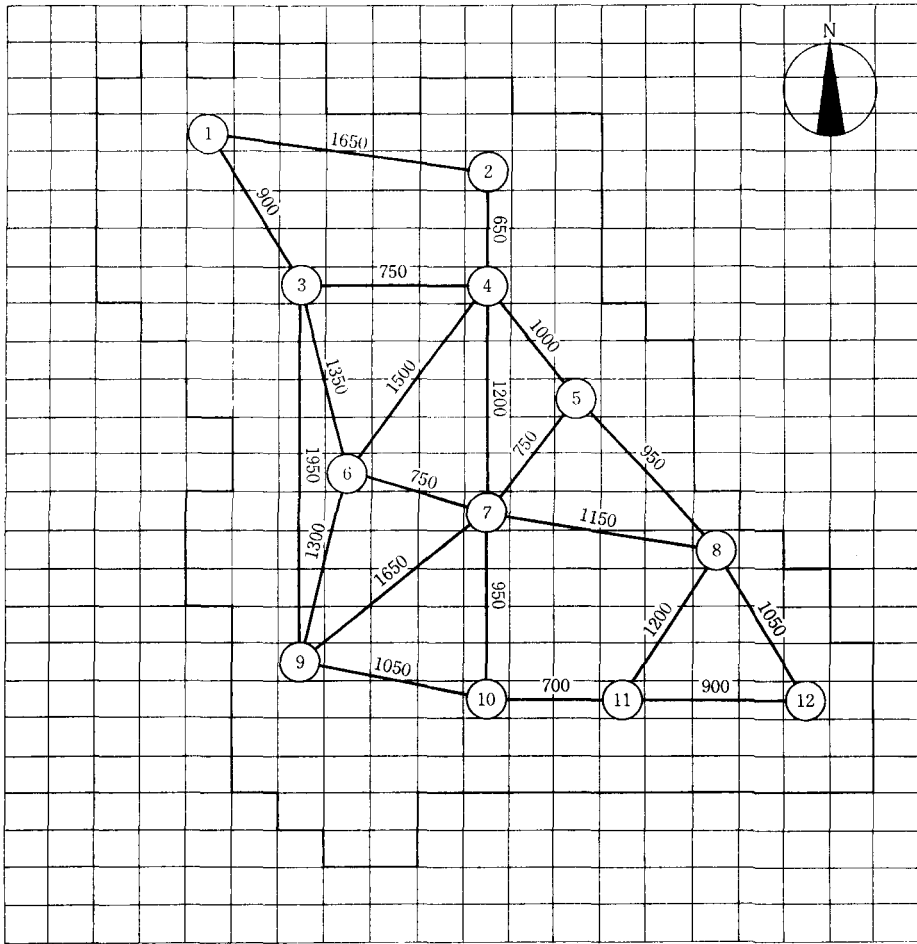


図 2 条件を満たす最小ネットワーク 単位m(1目盛220m×180m)

現在のタクシーを自動運行するような個別軌道輸送機関 (Personal Rapid Transit) とがあるが、ここでは後者のみを対象にしている。したがってシステムの仕様のうち、車両の定員は最初から1人に限定していることになる。

まず駅の位置を求めてみると、図2に示した12個所がアクセス時間の制約条件を満たす最小の駅配置となり、ついでその間に軌道をミニマム・スパンニング・ツリーから順次増やしていくと、同じく図2の状態が移動時間の制約条件を満たす最小のネットワークであることが判った。そこでこのような施設の状態において、車両の最高速度を時速45kmから125kmまでの範囲、車両の平均運行間隔を30秒から300秒までの範囲、料金をキロメートル当り50円から250円までの範囲で変化させると、経営に関する条件について図3、図4、図5、目的関数の値について図6、図7、図8のような関係が得られた。図3、図4、図5から車両の最高速度については、時速

50kmから125km、車両の平均運行間隔については、70秒から180秒、料金についてはキロメートル当り75円から150円の範囲でしか、このシステムが経営的に成立しないということが判る。また、目的関数の値については図6、図7、図8から速度は時速70kmから80kmの範囲でどれも最小となるが、平均運行間隔と料金については、他の変数の変化とともに最小値の求まる位置が変わることがわかる。そこで、以上の範囲について、より細かく変数を変化させていくと、最終的には車両の最高速度が時速80km、車両の平均運行間隔が93秒、料金がキロメートル当り75円とすると、経営の制約条件、サービスの制約条件の両方を満たして目的関数が最小になることが判った。つぎに軌道のリンクを増加させて同じ計算をしてみると、これ以上の軌道ネットワークではすべての場合に経営的制約条件を満たさないという結果が得られた。そのような場合、これまでのシミュレーションによる結果などから駅の数を増やしても同様の結果になる

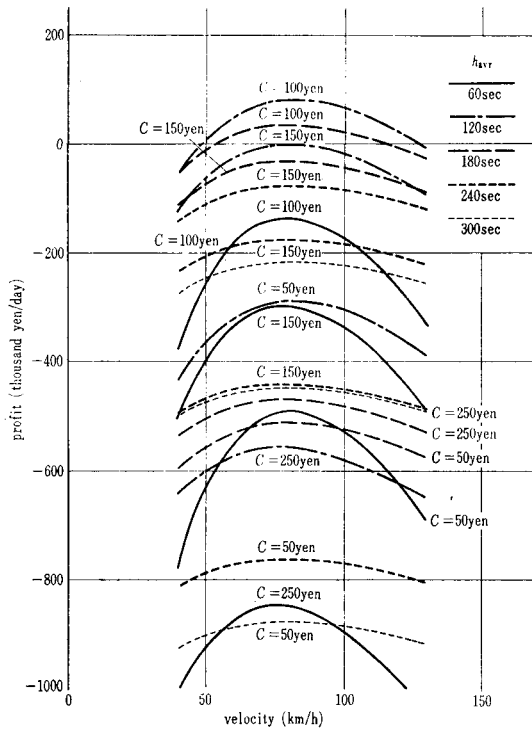


図 3 車両の最高速度とシステム運営上の利益との関係

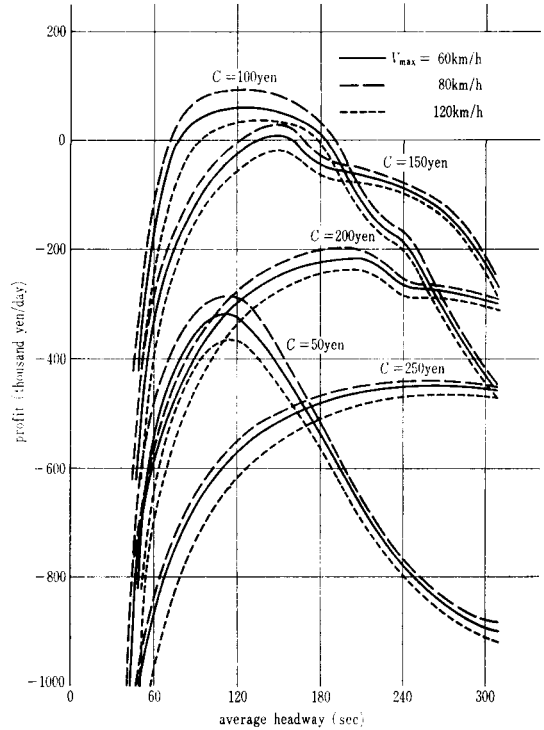


図 4 車両の平均運行間隔とシステム運営上の利益との関係

ことが経験的に判っていたので、ここで打ち切り、図 2 に示したような施設で上述のような運行をするのが最適の状態であると判断した。

#### 4. 結論

最初に述べたように、各車両の移動を何らかの形で制御できるという新しい形式の交通機関については、このような方法である種の最適設計の可能性があることが判ったが、まだ残された問題として複数の交通手段を組合せて最適にする場合はここではまったく扱われていないし、技法的には中量軌道輸送機関のような乗合制にしてある決まった路線を車両が走行する場合について、走行路線の最適化する方法を考える必要もあるなど、これから考えていくべき範囲はまだ広いといえる。

なお、紙数の関係でモデルの詳細や具体的な数値などについては省略したが、詳しくは以下の 2 誌に発表してあるので参照されたい。

月尾嘉男, 石井威望「一定のサービス水準を満たす最適な交通手段の基本仕様を求める方法試論」(昭和52年度第12回日本都市計画学会学術研究発表会論文集)

T. Ishii, Y. Tsukio 「A Method of Deciding the Optimal Specifications of Transit Systems」(Pro-

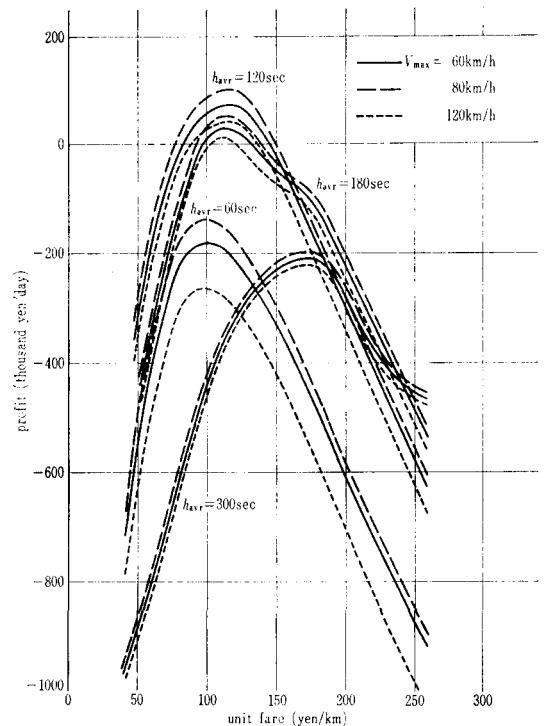


図 5 単位料金の変化とシステム運営上の利益との関係

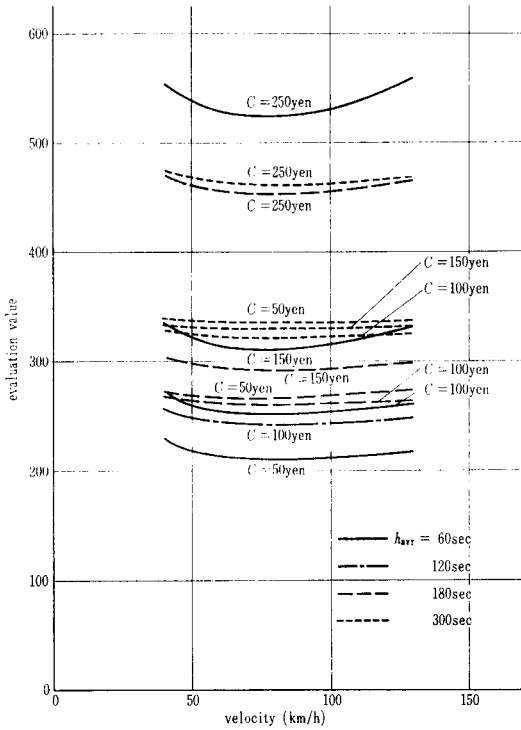


図 6 車両の最高速度と目的関数の値との関係

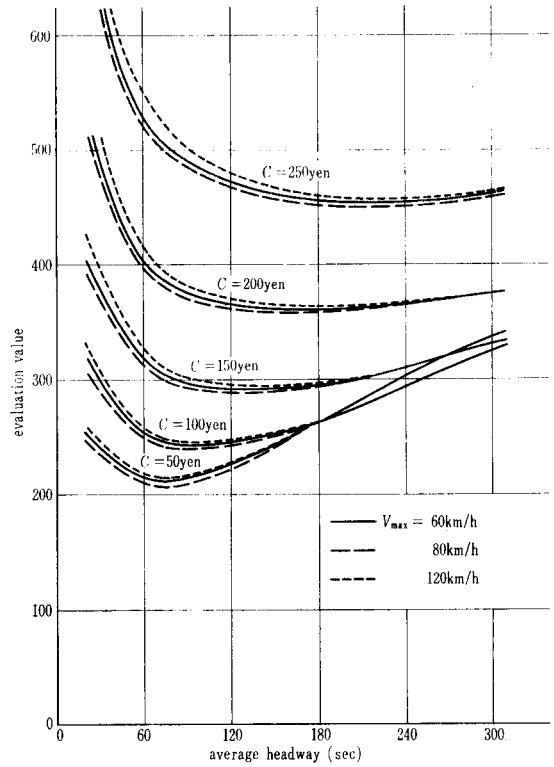


図 7 車両の運行間隔と目的関数の値との関係

ceedings of the First International Conference of Advanced Transit Association 1978)

(つきお・よしお 名古屋大学工学部)

### 次号予告

#### 特集 流通

- |                     |      |
|---------------------|------|
| 流通問題のOR的考察について      | 林 周二 |
| ショッピング・センターの配置問題    | 上原征彦 |
| チェーン・ストアの出店計画       |      |
| 医薬分業をめぐる諸要因         |      |
| ——要因関連表による分析——      | 久慈光亮 |
| 解説                  |      |
| OR, そのみなもとをたずねる(II) | 岸 尚  |
| 総合報告                |      |
| 整数/組合せ計画法の現状(その6)   |      |
| 組合せ問題計算上の複雑さについて    | 大山達雄 |

官庁統計の利用と普及

高木新太郎

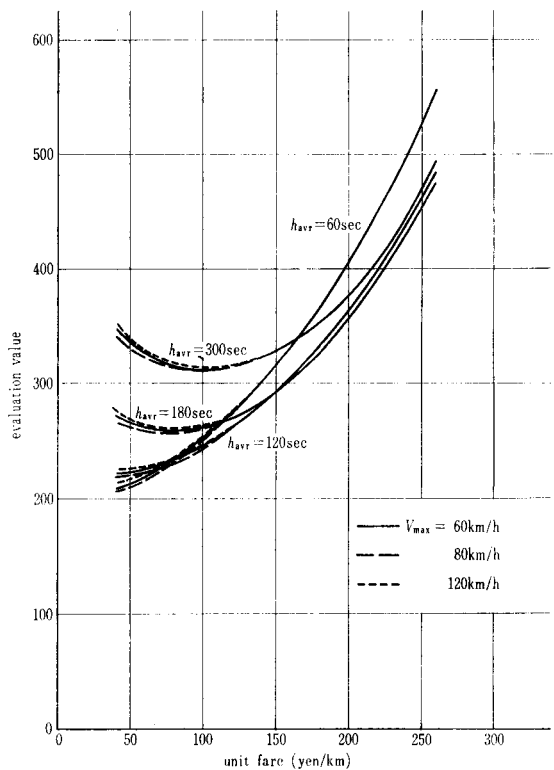


図 8 単料金の変化と目的関数の値との関係