

## 旅客輸送機関停車駅の最適配置

OPTIMAL STATION LOCATION FOR A PASSENGER  
TRANSPORTATION SYSTEM

福 山 正 治\*

By Masaharu FUKUYAMA

## 1. ま え が き

都市、また、その周辺の旅客輸送を担う、バス、鉄道の運行形態は多岐にわたる。一つの路線に限っても、比較的長いトリップのための幹線手段と、局所的な短トリップ、および幹線手段へのアクセスのための手段とが併せて運行される形態を取っている。たとえば、幹線手段をバス、鉄道、あるいはそのうちの急行列車等と考えるならば、短トリップまたは、アクセスの手段は、徒歩、バス、普通列車等となる。

上記 2 種の手段をいかに適切に組み合わせ運行形態を決定するかということは、旅客輸送計画の基礎的課題であることはいうまでもない。ここでは、これら 2 種の交通手段が並行して運行されている場合を想定し、2 種の手段の接点となる。幹線手段の駅の配置について論じる。

旅行者は、アクセスの手段で最寄りの駅へ行き、幹線手段で目的地近くの駅まで旅行し、再びアクセスの手段を使い旅行を終えるか、または、アクセスの手段のみでトリップを終えると想定される。旅行者が幹線手段を用いるのは、それにより何らかの便益を得る場合であり、この便益はその手段を利用することによって得る旅行費用、時間の節約量と考えることができる。幹線手段を用いなければ、その便益は零である。これら各個人の便益を加えたものが総便益となり、これから、幹線手段の駅建設、運営に必要な費用を差し引いたものが純便益となる。ここでは、この純便益が最大となるように駅の配置を決定する。

旅行者に係るおもな費用には、交通機関を利用する際の料金、および、旅行時間がある。時間と金額は時間価値を媒介に一つの単位に統一し得るが、ここでは、時間価値は与えられているものとし、この値を用い、すべて

の費用は時間に換算されているものとする。

一般に駅の配置は、利用客の発生集中パターン（または OD 分布パターン）に依存する。従来の研究は、このトリップの発生集中パターンの取扱い方により、一点集中型 (multiple origins but single destination)、および、多発生集中型 (multiple origins and destinations) のモデルに分類される。

一点集中型モデルでは、トリップの発生（集中）は、路線に沿って、または、二次元平面上に分布しているが、トリップの集中（発生）は一点（たとえば CBD）としている。この種のモデルに対しては、トリップの発生が路線に沿って一様である場合の解は Landau<sup>6)</sup> が、また、それが一般的な場合の解は、Vuchic and Newell<sup>8)</sup> によって求められている。富井、河内<sup>7)</sup> は、複々線快速停車駅の決定について論じており、特に乗り換え費用について考察している点に特徴がある。Wirasinghe, Hurdle and Newell<sup>9)</sup>、および、Wirasinghe<sup>10)</sup> はトリップの発生が二次元平面上に分布している場合についての考察を行っている。

一点集中型のモデルでは、上述のごとく一般化されたモデルが発表されてきているが、集中点を一点であると想定することは難しい場合が多い。また、これらモデルにおいては、集中点に近づくにつれて駅間隔を長く与える傾向があり、集中点を都心と考えた場合など現実的でない解を与えている。

一方多発生集中型のモデルでは、トリップの発生、集中の分布をともに考えモデルを作成するが、解析が複雑となるため、一点集中型モデルほどの一般化はなされていない。Bentsen<sup>1)</sup>、Fukuyama<sup>3)</sup>、Landau<sup>2)</sup> はトリップの発生集中が路線に沿って一様に分布し、駅が等間隔に配置されている場合を論じており、Bentsen はアクセスを徒歩とした場合を、Landau は任意の 2 種の交通手段に対する解を求めている。Fukuyama はさらに待ち時間の影響、トリップの発生集中が二次元平面上に分布して

\* 正会員 Ph.D. (株)三菱総合研究所研究員

いる場合についても考察している。任意のトリップ発生集中分布に対するモデルは、Wirasinghe and Ghoneim<sup>11)</sup>、および Fukuyama<sup>1)</sup> によって論じられており、前者は、2種の手段がバス、および、徒歩の場合、後者は、それを任意とした場合について論じている。しかし、上記2つのモデルのいずれも待ち時間、または、乗り換え費用については考慮していない。

本稿では、Fukuyama<sup>1)</sup> のモデルをさらに発展させ、アクセスの手段と、幹線となる手段の間の乗り換え費用の影響を加味したモデルを作成する。乗り換え費用が増加すれば、アクセスの手段のみで直接目的地へ行くトリップが増加し、幹線利用客の流動パターンが変わってくるのが当然予想され、駅配置の様相も変わってこよう。

駅の配置は、駅の建設費用にも依存する。Wirasinghe, Hurdle and Newell<sup>9)</sup>、Wirasinghe<sup>10)</sup>、Wirasinghe and Ghoneim<sup>11)</sup> は、駅建設費用がすべての地点で等しいとし、その影響をモデルに組み入れている。しかし、駅建設費用は、地価、工事の難易度等に依存し、路線に沿った各点で異なる。したがって、ここでは、駅建設費用が建設位置に依存する場合を想定してモデルを作成する。

駅配置の最適化は、ダイナミック・プログラミングを含むアルゴリズムを通じて行う。

## 2. モデル

### (1) モデルの前提

以下、幹線およびアクセス、または、短トリップのための手段をそれぞれ、鉄道およびバスとして話を進める。もちろん状況を同じくする他の場合、たとえば、急行列車に対して、普通列車を考える場合等にも適用可能である。

モデル作成の仮定として以下を設ける。

- a) 鉄道とバスは並行して運行されるものとし、トリップはバス路線に沿って発生集中する。
- b) 各旅行者は旅行費用(料金および時間等)が最小となる経路、すなわち、鉄道利用による便益が非負となる経路を選ぶ。鉄道を用いない場合には、その便益は零である。
- c) バスの走行速度は全線を通じて一定とする。また、バスは、鉄道へのアクセス、および、競合する手段として利用されるものとする。
- d) 鉄道列車の走行速度は、すべての駅区間で等しく一定とする。各駅での停車時間、加減速度もすべて等しいとし、加減速による時間損失は、停車時間に含めて考

える。

e) 乗り換え費用は、それに費やす時間および幹線を利用するために追加される料金等を含む。問題を簡素化するため、乗り換え費用はすべての旅行者を通じて等しいとする。

上記 a) でのトリップがバス路線に沿ってのみ発生集中するという仮定は、以下モデルを展開していくにあたって必要となるものであり、実際の応用に際しては、必ずしも厳密にそうである必要はない。応用例で示すが、二次元平面で発生するトリップは路線に沿って発生集中するトリップに置き換え解析を行うことが可能である。

また、e) での乗り換え費用一定の仮定は、解析の簡素化を計るためのものではあるが、実際、駅配置計画段階において、路線全域のすべての点での乗り換え施設の構造、また、アクセス手段の詳細な料金体系を設定することは困難であり、標準的な乗り換え施設、料金体系を想定し、一つの平均的乗り換え費用を算定する方が合理的であると考えられる。

図-1 に示すように、鉄道、バス路線を横軸に取り、路線の左端を原点 O、右端を点 E とする。路線長を L で表わし、O と E の間に (N-1) 個の駅が設置されるものとする。O と E は常に駅と考える。トリップの発生点を x、集中点を y で表わし、路線に沿っての任意の点を z で表わす。特定の点を i, j 等とした場合には、その点の座標は、z<sub>i</sub>, z<sub>j</sub> 等で表わすものとする。

### (2) 鉄道利用者の便益および分担の境界

最初に乗換費用が零の場合の、鉄道利用者便益を導出する。図-1 で、x ≤ y、すなわち、右方へ旅行するトリップを考え、そのトリップが一つの駅区間 (i-1, i)、(i=1, 2, ..., N) を鉄道で通過した際、その区間から得る便益を考える。x ≤ z<sub>i-1</sub> であれば、その便益、a<sub>i-1,i</sub> はバスでの所要時間から、鉄道での所要時間を差し引いたものとなり、次式で与えられる。

$$a_{i-1,i} = (1/v - 1/V)(z_i - z_{i-1}) - S \dots \dots \dots (1)$$

ここに、v: バスの走行速度で、停車の影響等を含んだ平均速度

V: 鉄道列車の走行速度

S: 列車の停車に伴って生じる時間損失で、停車時間、加減速の影響を含む

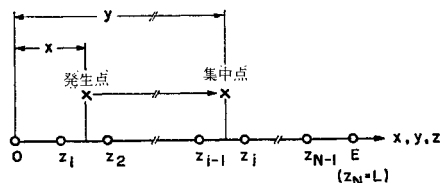


図-1 座標の設定

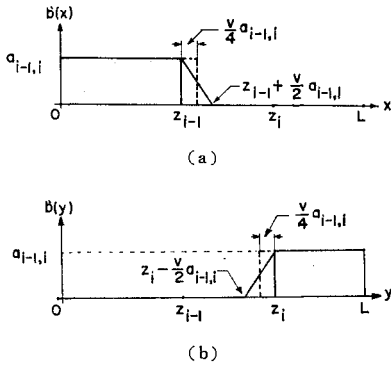


図-2 発生点  $x$  または集中点  $y$  のトリップが区間  $(i-1, i)$  から得る便益

もし、 $z_{i-1} \leq x < z_i$  のトリップが、この区間で鉄道を利用したとするならば、トリップ発生後、バスでいったん駅  $(i-1)$  まで逆行し、そこで鉄道に乗り換え右方へ旅行する。逆行し得る最大距離は、逆行をし  $z_i$  に達するまでの所要時間と、逆行せず直接、バスで  $z_i$  に達した場合の所要時間が等しくなる点を調べればよく、それは  $(v/2)a_{i-1,i}$  で与えられる。

以上の考察により、 $x \leq z_i$  に発生したトリップが、区間  $(i-1, i)$  を鉄道で旅行して得る便益  $b'(x)$  は、図-2 (a) のごとく表わし得る。逆行を行うトリップ ( $z_{i-1} < x \leq z_{i-1} + (v/2)a_{i-1,i}$ ) の便益が逆行する距離に比例して減少することは簡単に証明し得る。

以下の解析においては、計算の簡略化を計るため、図-2 (a) 中の破線で逆行を行うトリップの便益を近似する。すなわち、この近似では、 $x \leq z_{i-1} + (v/4)a_{i-1,i}$  のトリップはすべて  $a_{i-1,i}$  の便益を得、その他のトリップは鉄道を利用せず、その便益が零としている。ただし、この近似は、計算の簡略化のためだけであり、この近似を行わないまま、同様の議論を進めることも可能である (近似を行わない場合の式、近似の性質については Fukuyama<sup>9)</sup> に記してある)。

トリップの集中点  $y$  に関する便益  $b'(y)$  も同様の考え方から求まり、図-2 (b) を得る。

図-3 は、発生集中点のペア  $(x, y)$  に対応する便益  $b'(x, y)$  を図示したものである。明らかに、 $x \leq z_{i-1} + (v/4)a_{i-1,i}$  かつ、 $y \geq z_i - (v/4)a_{i-1,i}$  であるトリップ

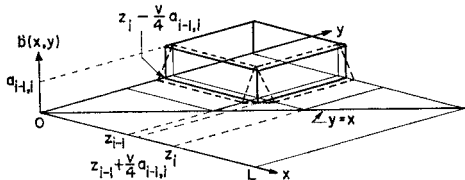


図-3 点  $x, y$  に発生集中するトリップが区間  $(i-1, i)$  より得る便益

のみが、区間  $(i-1, i)$  を鉄道で旅行して便益を得るので、結局、図-3 に示す、直方体の底面に対応する OD ペアのみが区間  $(i-1, i)$  より便益  $a_{i-1,i}$  を得ることになる。図中破線は、Fukuyama<sup>9)</sup> によって求められている便益を示したもので、前述の近似を行わない場合のものである。

図-3 に示す便益は、すべての駅区間に対して求め得るので、合計  $(N-1)$  個の図を描くことができる。各旅行者が、1つのトリップ全体から得る便益は、そのトリップが鉄道を利用した駅区間の  $a_{i-1,i}$  をすべて加えれば求まる。この過程を図上で考えれば、それは  $(N-1)$  個の図を重ね合わせることに相当し、図-4 を得る。図の縦軸  $b(x, y)$  は点  $x, y$  に発生集中するトリップの得る便益を表わしている。

図-4 中の便益を表わす図形が  $x-y$  平面と交わってできる折線は、鉄道利用者の領域と、バスのみで旅行を終える旅行者の領域 (図中斜線を施した部分) との境界を示しており、以下この境界を“分担の境界”とよぶことにする。

乗り換え費用が正であれば、各旅行者の便益は、上で求めた便益から、その乗り換え費用を差し引くことによって求まる。いま、乗り換え費用がトリップの発生集中地点に依存せず一定  $T$  とするならば、図-4 の便益の図形を  $b(x, y)$  軸に沿って、下方へ  $T$  だけ平行移動させることにより、その便益が求まることになる。それを図-5 に示す。便益が負となった旅行者は、バスのみでトリップを終えることになり、その便益は、改めて零となる。図より明らかであるが、 $T$  が増加すれば、分担の境界は、直線  $y=x$  より遠ざかり、トリップ長の短

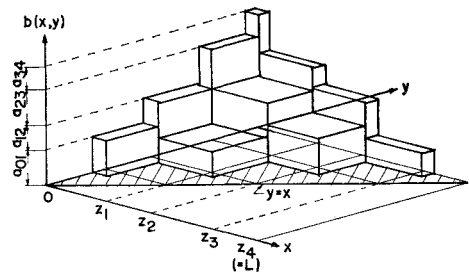


図-4  $T=0$  の場合の便益

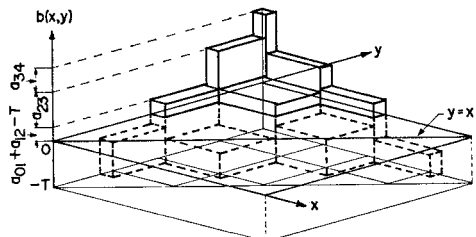


図-5  $T>0$  の場合の便益

い旅行者は、鉄道からバスのみでのトリップに移ることがわかる。

以上、 $x \leq y$  のトリップについてのみ考えてきたが、 $x > y$ 、すなわち、図-1 中左方へ旅行するトリップに関する便益も同様の考え方で求まる。しかし、いま、バスの速度  $v$ 、列車速度  $V$ 、停車時間  $S$ 、乗り換え時間  $T$  が運行方向に関係せず一定だとすれば、 $b(x, y) = b(y, x)$  であり、 $b(x, y)$  は  $y = x$  に関して対称となる。すなわち、一方向のみを考えておけば十分であり、以下、 $x \leq y$  の場合についてのみ考えていく。

(3) 目的関数

分担の境界を  $y = \mu(x)$  で表わすとすると、総便益  $TB$  は次式で求まる。

$$TB = \int_0^L \int_{\mu(x)}^L \{b(x, y) - T\} f(x, y) dy dx \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $L$  は前述のごとく鉄道路線長であり、 $f(x, y)$  は地点  $x, y$  の近傍単位長さ当たり、単位時間に発生集中するトリップ数である（以下、OD トリップ密度分布とよぶ）。一般に、 $f(x, y)$  は  $x \leq y, y > x$  の両方向で異なる。しかし、上で述べたように、便益が  $y = x$  に関して対称であるので、 $f(x, y) + f(y, x)$  を改めて  $f(x, y)$  としておき、 $y \geq x$  のみを考えればよい。

式 (2) は次のように書き換えることもできる。

$$TB = \int_0^L \int_x^L b(x, y) f_{\mu}(x, y) dy dx - T \int_0^L \int_x^L f_{\mu}(x, y) dy dx \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $f_{\mu}(x, y)$  は次のように定義される。

$$f_{\mu}(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & \text{if } y \geq \mu(x) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

式 (3) において、最初の項は、鉄道利用者の  $T=0$  の場合の総便益を示し、第 2 項は、乗り換えによる総費用を表わしている。

式 (3) の第 1 項は 図-3 から求めることができる。それには、まず、 $A_{i-1, i}$  を次式で求める。

$$A_{i-1, i} = a_{i-1, i} \int_{z_i - \frac{v}{4} a_{i-1, i}}^{z_{i-1} + \frac{v}{4} a_{i-1, i}} f_{\mu}(x, y) dx dy \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、 $A_{i-1, i}$  は、区間  $(i-1, i)$  を鉄道で通過するすべてのトリップの総便益である。これをすべての区間について加えれば、式 (3) の第 1 項に相当するものになる。

最後に、駅建設費、鉄道運営費を含め、純便益  $BL$  を次式によって求めることができる。

$$BL = \sum_{i=1}^N (A_{i-1, i} - c_i)$$

$$- T \int_0^L \int_x^L f_{\mu}(x, y) dy dx - c_0 - CT \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $c_i$ ：点  $i$  に駅を配置した場合の駅建設、運営費用

$CT$ ：駅建設、運営以外に必要な費用（路線建設、車両購入費等）

であり、 $c_i, CT$  は推計された費用（金額）を時間価値（金額/時間）で除し時間の単位に換算しているものとする。

式 (5) が、本モデルの目的関数であり、決定すべき変数は、最適駅数  $N$  および駅配置点  $z_i (i=1, 2, \dots, N-1)$  である。

(4) 最適化

式 (5) を最大化するにあたり、最も問題となるのは、分担の境界  $y = \mu(x)$  が  $z_i, T$  により、複雑に変化するところにある。しかし、いま、 $y = \mu(x)$  が、 $z_i, T$  に依存しないと設定することができるなら、 $f_{\mu}(x, y)$  は決定され、式 (5) の第 2 項は定数となり、第 1 項のみを最大化すればよいことになる。この場合の最大化は、Fukuyama<sup>4)</sup> が、乗り換え費用が零である場合に用いた、ダイナミック・プログラミングを応用することによって成し得る。

これには、まず、路線に沿って駅の候補地  $1, 2, \dots, j, \dots, k, \dots, M-1$  を与え、各点をノードとした。グラフ、図-6 を考える。ここで、図中各ノードを結ぶアークに、各ノード間を一つの駅区間とした場合、その区間から得られる便益  $A_{jk} - c_k$  を対応させておく。すなわち、図-6 において、点 0 から、最終点  $M$  に至るルートの中から、便益が最大となるルートを選びだせば、最適駅配置が求まることになる。このルートの通過するノードが駅配置点であり、その個数が最適駅数である。

ダイナミック・プログラミングの定式化には、まず、最適値関数  $TB(k)$  を次のように定義する。

$TB(k)$  = 点 0 から点  $k$  の間に、駅を最適に配置した場合に、区間  $(0, k)$  から得る最大便益

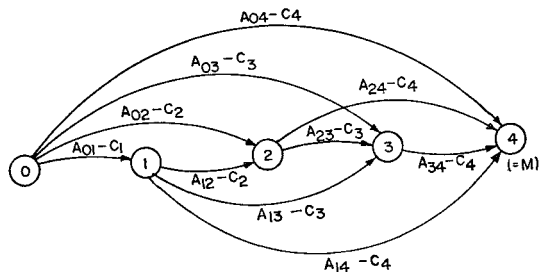


図-6 ダイナミック・プログラミングに対応するグラフ

この  $TB(k)$  を用いれば、繰り返し関係は

$$TB(k) = \max_{j=0,1,2,\dots,k-1} \{TB(j) + A_{jk} - c_k\} \dots (6)$$

となる。境界条件を、 $TB(0)=0$  とし、 $k=1, 2, \dots$  の順に式 (6) を計算していけば、 $TB(M)$  に最適解が求まる。最適政策関数  $P(k)$  には、各  $k$  において式 (6) を最大とした  $j$  の値、すなわち、 $k$  に至る直前の最適駅位置を記憶させておく。最適駅地点は、上記計算終了後、 $P(M)$  から順次さかのぼって探していけばよい。

以上のことを踏まえて、式 (5) を最大化する次のアルゴリズムを考え得る。

- (a) 初期駅配置  $z_i^0 (i=1, 2, \dots, N)$  を仮定する。
- (b)  $\mu(x)$  の初期値となる  $\mu^0(x)$  を求め、 $f_\mu^0(x, y)$  を決定する。
- (c) 前ステップで求めた  $f_{\mu^{\phi-1}}(x, y)$  を使い、ダイナミック・プログラミングで最適駅配置  $z_i^\phi (i=1, 2, \dots, N)$  を求める。
- (d)  $|z_i^\phi - z_i^{\phi-1}| < \epsilon (i=1, 2, \dots, N)$  であれば、計算を終了し、そうでなければ、ステップ (e) へ行く。ここに、 $\epsilon$  は、 $z_i^\phi$  が  $z_i^{\phi-1}$  に等しいかどうかを判断するための誤差限界である。
- (e)  $z_i^{\phi-1}$  を改めて  $z_i^\phi (i=1, 2, \dots, N)$  とおき、 $\mu^{\phi-1}(x)$  を求め、 $f_{\mu^{\phi-1}}$  を決定する。
- (f) ステップ (c) に戻る。

上記アルゴリズムの収束性、また、さらには最適解への収束性を数学的に保証することは困難と考えられる。しかしながら、補助的アルゴリズムを導入することにより、収束、また最適解への収束の可能性を高めることは可能である。これには、まず、ダイナミック・プログラミングにより、 $T=0$  の場合の最適解を直接求めることができるという性質を用いる。 $T=0$  であれば、式 (4) の  $f_\mu(x, y)$  は  $f(x, y)$  で置き換えられ、式 (5) の第2項はゼロとなり、ダイナミック・プログラミングを1回適用するだけで最適解を求めることができる。次に乗り換え時間が  $T+\Delta T$  である場合を考える。この場合の  $\Delta T$  が十分小さければ、 $T+\Delta T$  での最適駅配置は  $T$  でのそれとは、あまりかけ離れていないと想定できる。これは分担の境界すなわち、 $x-y$  平面上での鉄道利用者と、バスのみで旅行を終える旅行者との境界、についても同様にいえることである。さて、いま、 $T=0$  の解として求まっている最適駅配置を初期値として上記アルゴリズムを適用し、 $T+\Delta T$  の最適解を求めることを考えてみよう。 $T$  を  $T+\Delta T$  とすることにより、鉄道利用者の一部、特にトリップ長が短く、鉄道を利用することによって得る便益の少なかった旅客は、バスのみでの旅行に移行する。すなわち、分担の境界は変化する。しかし、この場合、この移行する旅行者の鉄道利用客全体に対する割合が十分小さくなるように  $\Delta T$  が設定され

ていれば、鉄道利用者全体の便益のみを最大とすることにより、十分最適解に近い近似値を求めることが可能であろう。このような状態に上記アルゴリズムを適用した場合、第1回目の計算でかなり最適解に近い近似解が求まっていると想定される。さらに、繰り返しを続け、分担の境界を徐々に補正していき、最適解に対する分担の境界に達したならば、それ以降の繰り返しでは、分担の境界に変化はなく繰り返し計算が収束したことになる。以上述べたことは、 $T+\Delta T$  の解を初期値とし、 $T+2\Delta T$  での最適解を求める場合、さらに、それ以降の  $T$  に対する最適解を求める場合にも同様にいえる。以上をまとめると以下のアルゴリズムを得る。

- (i)  $T=0$  の場合の最適駅配置をダイナミック・プログラミングで決定する。
- (ii)  $T=T+\Delta T$  として以下のステップへ進む。
- (iii) 前ステップで求めた駅配置を初期値として、前述のアルゴリズムで最適駅配置を決定する。
- (iv) ステップ (ii), (iii) を繰り返す。

上記の手順全体をまとめたのが、図-7 のフローチャートである。このフローチャートでは、純便益が負となったところで、計算を終えるようにしてある。明らかに、 $T$  が増加していけば、鉄道利用者は減少していき、利用者の便益も減少する。したがって、ある  $T$  に達したとき、純便益が負となり、鉄道運営の意味が失われる。

### 3. 適用例

リオデジャネイロ都市圏公社(Companha do Metropolitano do Rio de Janeiro-Metrô)<sup>2)</sup> は、リオデジャネイロ都市圏における都市高速鉄道整備計画を発表している。ここでは、この計画の一環として建設が予定されている都市高速鉄道 Linha 3 を対象に本モデルの適用を試みた。

図-8 に、モデルの適用地域および計画路線を示す。この地域は、リオデジャネイロ市の CBD の西約 20 km の所に位置し、ほぼ南北に連なる4つの地区(図中の地区 11, 14, 15, 16)から成っている。地域総面積は約 195 km<sup>2</sup> であるが、そのうち 36% は岩山で、市街化可能面積は約 125 km<sup>2</sup> である。地区 15 は、北部の商業地

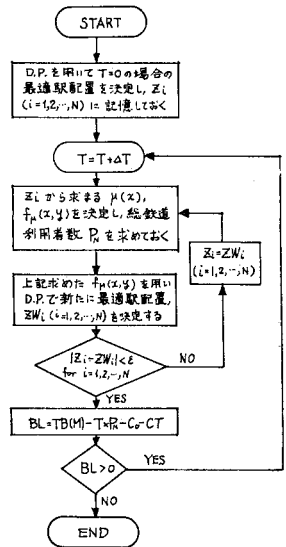


図-7 最適駅配置決定フロー

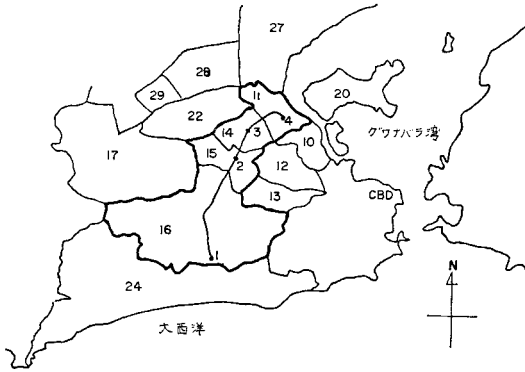


図-8 モデル適用地域

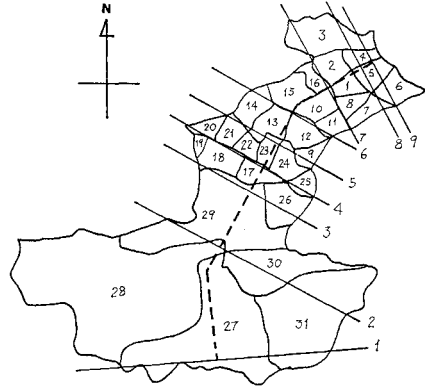


図-9 ゾーン区分

区で、リオデジャネイロの副都心ともよばれている地区であり、地区 11 は湾に面した工業地区である。これら地区を中心に現在約 84 km<sup>2</sup> が市街化されている。この地域の人口は、1979 年に 121 万人、1989 年には、173 万人に達すると推定されている。

鉄道路線長は、約 19.8 km で、17 個の駅の配置が計画されている。この計画では、バスをアクセスの手段と考え、また、路線を挟む岩山のため、鉄道とバス路線が競合して存在することになり、本モデルの前提と合致している。また、リオデジャネイロ都市圏内において、トリップ数での機関分担をみるとバスが全体の約 80%<sup>2)</sup> を占めており、駅配置設定にあたり、他手段、特に乗用車等の影響は考慮する必要がないと想定される。

Metró (前述の公社の略称) はバス利用トリップに関し 図-8 に示す地区区分レベルでの OD 交通量 (1976 年調査) および 1989 年推定 OD 交通量、さらに、図-9 に示す、ゾーンレベルでの OD 交通量 (1976 年調査) を報告している。ここでは地区区分レベルでの OD 交通量 (1976 年調査および、1989 年推定 OD 交通量) から、その地区の成長率を求め、それを 1976 年、ゾーンレベルの OD 交通量に適用することによって、1989 年ゾーンレベルでの OD 交通量を推定した。

$f(x, y)$  を求めるには、まず、路線を折れ線で近似し、図-9 に示すように、この地区を 8 つの区域に分割した。次に、各区域に含まれるゾーンに発生集中する交通は、すべて、その区域に含まれる路線区間から発生集中するものとして、 $f(x, y)$  を求めた。ここに、直線 1 より南、また直線 9 より北東の区域は、区間 1-2 および 8-9 にそれぞれ含ませ、2 つの区域にまたがっているゾーンは、属する面積の多い区域に属しているとしている。

区間に南から順に 1 から 8 までの番号を付けることにし、その区間長、また、駅 1 からの累積距離を表-1 に示す。また、表-2 には求めた  $f(x, y)$  (すなわち 1 日当たり、 $x$  の近傍 1 km 内に発生し、 $y$  の近傍 1 km 内

表-1 区間長および点 1 からの累積距離 (km)

区間番号	1	2	3	4	5	6	7	8
区間長	6.4	3.6	1.6	1.6	1.6	2.4	2.0	0.8
点 1 からの累積距離	0.0	6.4	10.0	11.6	13.2	14.8	17.2	19.2

表-2 対象地域内 OD トリップ密度分布 (Trip/km<sup>2</sup>/day)

		1	2	3	4	5	6	7	8
集	8	1 198	991	3 467	6 673	3 377	8 490	24 640	67 754
	7	338	2 178	2 579	6 663	4 387	5 488	15 802	
	6	642	666	1 615	4 969	6 473	6 100		
	5	618	2 826	3 865	14 048	4 884			
	4	3 036	6 552	10 460	24 272				
	3	4 136	8 243	12 716					
	2	3 716	894						
	1	2 042							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		発生							

表-3 対象地域内外にわたるトリップ (Trip End/km/day)

区間番号	1	2	3	4	5	6	7	8
EO	7 171	7 171	22 986	22 986	11 469	11 469	38 361	38 361
EL	2 053	2 053	3 002	2 002	753	753	1 191	1 191

に集中する OD トリップ密度分布) を示し、 $x > y$  のトリップは、対応する  $x \leq y$  のトリップ数に加えてある。

この地域と他地域との間の交通量は、1989 年地区区分レベルの OD 交通量から求め、それを表-3 に示す。表中 EO は 図-8 に示す路線の端点 1 にある駅を通過し、地域内各点にトリップエンドを有するトリップ数 (1 日 1 km 当たり) を、また EL はもう一方の端点 4 にある駅を通過し、地域内各点にトリップエンドを有するトリップ数 (1 日 1 km 当たり) を示す。これらトリップは、点 1、点 4 で発生集中するものとして取り扱っている。この地域を通過するトリップは 1 日当たり 11 640 トリップであり、これらトリップは、点 1 と点 2 の間を旅行するトリップと同様に取り扱っている。図-10 に

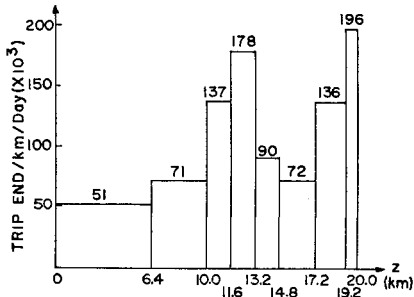


図-10 地点発生集中トリップ密度

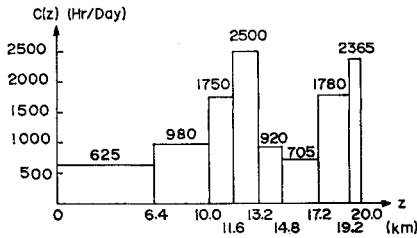


図-11 各地点での駅建設費用  $c(z)$

$f(x, y)$  の周辺分布および,  $EO, EL$  を加えた, 各地点でのトリップ発生集中密度を示す.

駅建設, 運営に必要な費用は, 2つの駅について計算した結果, 625 時/日 および 2500 時/日 とかなり幅のある値を取るという結果を得た (平均所得を平均就業時間で除した時間価値を用い, 建設費用を時間に変換). この最小, 最大の駅費用は, それぞれ人口密度の最も少ない地区, また, 大きい地区に対応していることもあり, ここでは駅費用を人口密度と関係づけ推定した. その結果を図-11 に示す. その他, 計算に用いたパラメータ値は次のとおりである.

$$CT = 67\ 652 \text{ 時/日}$$

$$V = 80 \text{ km/時}$$

$$v = 15 \text{ km/時}$$

$$S = 40 \text{ 秒}$$

$$\Delta T = 5 \text{ 分}$$

$$\epsilon = 0.5 \text{ km}$$

便益の計算は,  $x-y$  平面を 400 m の間隔の格子に分割して行い,  $\mu(x)$  は, 各格子点の  $b(x, y)$  を計算し,  $T$  と比較することによって求めている. ダイナミック・プログラミングの計算においても, 分割区間距離は 400 m としている ( $M=50$ ). この分割区間距離をより短く設定することにより, 計算精度の向上は計り得る. しかし, モデルで考慮していない要因たとえば, 実際の駅設計, 建設時に生じる局所的影響, 駅自体の物理的長さ, 最適とされた地点へのバスアクセスの可能性, すなわち, 鉄道路線を横切る方向の道路は必ずしも最適とされた点を通っているとは限らない点等も最終的駅配置には

影響を及ぼす. このような点を考慮すれば, 短い分割区間長を設定し計算時間を長くすることはあまり意味はなく, 上記での設定で十分と考えられる. 誤差限界  $\epsilon$  は, 隣接駅候補地 2 地点を含む 500 m とし, 1つの収束反復計算と次の反復計算においての駅地点の移動がすべての駅地点でたかだか 1 分割区間となった時点で収束したもとしている. 採用する最適駅配置は最後に計算された地点となる. これらの計算は, IBM 1130 を用いて行い, そのプログラムフローチャートの詳細は, Junquillo<sup>5)</sup> に記されている.

図-12 は, 式 (5) の最適解に対する値で, 各  $T$  についてプロットしてある.  $CT$  の値と比較するために,  $CT$  だけ上方へ平行移動して描いてある. この図より,  $T$  が 16 分以上になると, この鉄道運営は意味をなさなくなることが予想される.

図-13 は,  $T$  の値によって駅配置がどのように変化するかを調べたものであり, 短い縦の線が駅位置を表わ

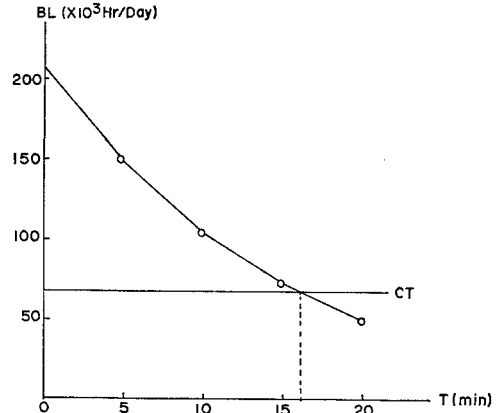


図-12  $T$  の増加に伴う純便益の変化

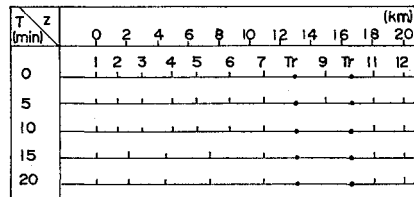


図-13  $T$  の増加に伴う駅配置の変化

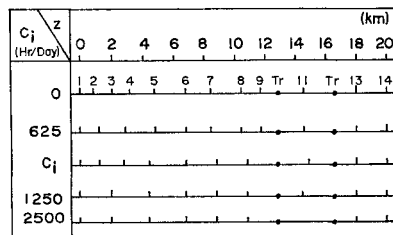


図-14 建設費用増加に伴う駅配置の変化 ( $T=0$ )

している。 $Tr$ と書いてあるのは、図—8中の点2,3に対応し、他の路線との交点であるので、乗り換え駅として常に存在するとしている。図より、 $T$ の増加に伴い駅数が減少し、駅間間隔が長くなることがわかる。しかし、トリップの発生集中密度の高い地点にある7および11の番号を付けている駅は、 $T$ の値が増加しても、その位置に存在しつづける傾向にある。

図—14は、駅建設、運営費用の感度分析を行ったものであり、すべての駅での費用が、0, 625, 1250, 2500時/日の場合、およびこの費用がその地点で変化する場合(図中の $c_i$ :図—14中の $T=0$ のケースと同じ)を調べたものである。この場合も、13を付した駅は常に存在しつづけ、建設費用の影響を受けていないことがわかる。他の点、特に、発生集中密度の少ない点( $z=0\sim 4$ )では、費用の増加に伴って駅数が減少している。

#### 4. あとがき

鉄道およびバスが並行して運行されている路線における鉄道駅の最適配置を決定するアルゴリズムを示した。特に、バス、鉄道間の乗り換えの費用、また、駅の建設、運営の費用が駅配置に及ぼす影響を考慮し得るモデルを提案している。

適用例を通じて得た結果は次のとおりである。

(1) 乗り換え費用が増加すれば、駅数が減少し、駅間間隔が長くなる。

(2) 駅建設、運営費用も、その増加に伴い駅数を減少させ、駅間間隔を長くする。

(3) しかし、これら費用の影響は、トリップの発生集中密度の高い地点では小さい。

以上、バスおよび鉄道を2種の交通手段と想定してきたが、モデル、および解析結果は、状況を同じくする他

の場合、たとえば、普通列車に対して急行列車の運行等の場合にも適用可能である。

#### 参考文献

- 1) Bendtsen, P.H. : Urban and suburban railways. Study of transport problems and network design, Danmarks Nalurvidenskabelige Samfund, pp. 154~159, 1938.
- 2) Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro-Metrô : Plano integrado de transports, SAPSA, Rio de Janeiro, Novembro, 1977.
- 3) Fukuyama, M. : Optimal station spacing for a transit line, Ph.D. dissertation, The Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1977.
- 4) Fukuyama, M. : Optimal station location for a two hierarchy transit system, Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Toronto, Canada, pp. 264~291, 1981.
- 5) Junquillo, W.R. : Otimização do espaçamento entre estações de sistemas ferroviários urbanos de passageiros, Tese de Mestrado, IME, April, 1981.
- 6) Landau, A.G. : Distance between stops on transport service minimizing travel times, International Symposium on the Theory of Traffic Flow, Proceedings, 4th, pp. 265~268, 1968.
- 7) 富井義郎・河内 清 : 複々線区間における列車運行の最適化に関する研究, 土木学会論文集, No. 259, pp. 103~109, 1977年3月.
- 8) Vuchic, V.R. and G.F. Newell : Rapid transit interstation spacings for minimum travel time, Trans. Sci. 2, pp. 303~339, 1968.
- 9) Wirasinghe, S.C., V.F. Hurdle and G.F. Newell : Optimal parameters for a coordinated rail and bus transit system, Trans. Sci. 11, pp. 359~374, 1977.
- 10) Wirasinghe, S.C. : Nearly optimal parameters for a rail/feeder-bus system on a rectangular grid, Transp. Res. A, Vol. 14 A, pp. 33~40, 1980.
- 11) Wirasinghe, S.C. and Nadia S. Ghoneim : Spacing of bus-stops for many to many travel demand, Trans. Sci. 15, pp. 210~221, 1981.

(1982.8.27・受付)