

I. まえがき 鉄道駅、バス停、急行停車駅の配置に関する研究は、最近、Fukuyama³⁾、畠井、河内⁴⁾、Wirasinghe⁵⁾等によって進められて来ている。これらの研究は、2種の交通手段が平行して運行されている路線を想定しており、1つの手段を幹線とし、他を、それへのアクセス、又は、競合手段と考えた場合に、前者、すなわち、幹線手段の駅をどのように配置すべきかについて論じている。その中でも、Fukuyamaは、2種の交通手段を任意とし、又、路線に沿ってのトリップ発生集中密度を任意に与え得るモデルについて論じており、これらは、以前のどの研究においても考えられていなかった点である。しかし、このFukuyamaのモデルは、アクセスの手段から、幹線手段への乗り換え費用を考慮しておらず、本稿においては、特に、この乗り換え費用が、駅配置にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

乗り換え費用が駅配置に影響を及ぼす場合としては、2つの交通機関、たとえば、バスと鉄道、が競合して運行されている場合などであろう。すなわち、バスから鉄道へ、又、逆に鉄道からバスへの乗り換え費用が増加すれば、旅行者は、鉄道に乗り換えることなく、直接、バスで目的地へ行くことになる。もし、バスのみで旅行するトリップが増加して行けば、鉄道利用客のトリップパターンが変わり、駅配置の様相も変わって来る。本稿では、主に、バスと鉄道を2つの交通手段と考えて行くが、もちろん、状況と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。

一般に、旅行者が鉄道を利用した場合に得る便益は、その利用によって生ずる、旅行費用の減少分と考えることが出来る。以下、その総和を総便益とし、この総便益から、鉄道施設の建設、運営の費用を差し引いた、総便益を最大とするように、駅の配置を決定する。ここに、費用はすべて時間に換算されているものとし、以下も同様である。

特に、建設費用に関しては、それが、建設地点によって異なる場合を考えており、駅建設費用が、その建設位置に依存すれば、駅配置がどのような影響を受けるかについて考察する。

II. 仮定 及び座標の設定 本稿においては、以下の仮定を設ける。

- i) 鉄道とバス路線は平行して運行されており、トリップは、バス路線に沿って発生集中する。
- ii) 各旅行者は旅行時間が最小となる経路、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。
- iii) バスの走行速度は、全線を通じて一定とする。又、バスは、鉄道へのアクセス、及び競合手段として利用される。
- iv) 鉄道列車の走行速度は、すべての駅区間で等しく一定とし、各駅での停車時間も一定とする。加減速の影響は、停車時間に含めて考える。
- v) 乗り換え費用は、すべての駅で等しいとする。

図1に示すように、鉄道、バス路線の左端を原点0とし、右端はEで表わす。路線長は、 L 、とし、0とEの間に $(N-1)$ 個の駅が設置されるものとする。0とEは単に駅と考える。トリップの発生点を x 、集中点を z で表わし、路線に沿っての任意の点を y で表わす。特定の点を、 z_i 等とした場合には、その点の座標は、 z_i 等と表わすものとする。

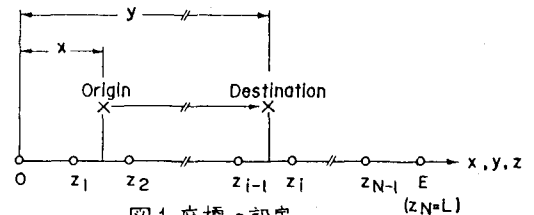


図1 座標の設定

Ⅲ. 目的関数の導出 最初に乗り換え費用が零の場合の、鉄道利用者便益を導出する。図1で、 $x \leq y$ 、すなわち、右方へ旅行するトリップを考え、そのトリップがいつの駅区間 $(i-1, i)$ 、($i=1, 2, \dots, N$) を鉄道で通過した際、その区間から得る便益を考える。 $x \leq z_{i-1}$ であれば、その便益、 $a_{i-1,i}$ 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。

$$a_{i-1,i} = \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)(z_i - z_{i-1}) - S \quad (1)$$

ここに、 v ；バスの走行速度で、停車の影響等を考慮した平均速度

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

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、バスで一旦、駅 $(i-1)$ 迄逆行し、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、逆行を行なって z_i に達する迄の所要時間と、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良く、それは、 $(v/2) a_{i-1,i}$ で与えられる。

以上の考察から、 $x < z_i$ に発生したトリップが、区間 $(i-1, i)$ で鉄道を利用して得る便益は、図2aの実線で示したものと与えられることがわかる。但し、図中縦軸、 b 、は便益を表わす。

以下の解析においては、計算の簡略化を計る為、図2a中の破線で便益を近似する。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、計算の簡略化の為であり、この近似を行なわねば、同様の議論を進ることも可能である。

トリップの集中点 y に関する便益も同様の考え方から求まり、図2bを得る。

図3は、発生集中点のペア (x, y) に対応する便益を図示したもので、実線で示される直方体は図2a, bを組み合わせたことによって求まる。図中破線は、Fukuyama¹⁾によって求められている便益を示し、前述の近似を行なわねばなら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出来る。各旅行者がい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

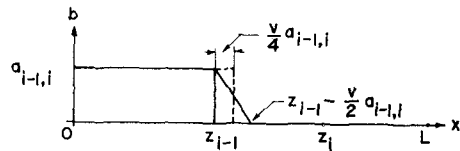


図2a

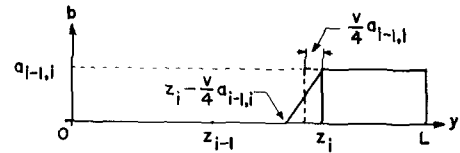


図2b

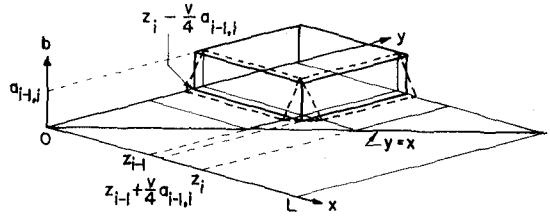


図3 区間 $(i-1, i)$ から得る便益

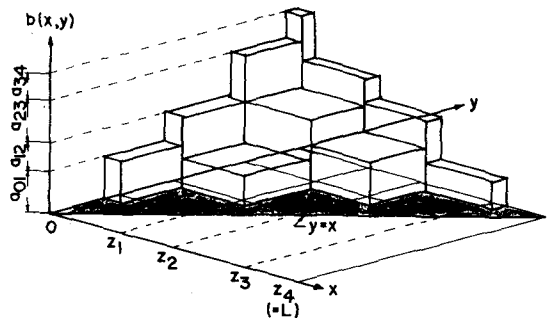


図4 $T=0$ の場合の便益

$A_{i-1,i}$ を加えれば求まる。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。“図中の便益を表わす図形が $x-y$ 平面と交わって出来る折線は、鉄道利用者の領域と、バスのみで旅行を終える者の領域（図中影を付けた部分）との境界を示しており、以下この境界を“分担の境界”と呼ぶことにする。

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。今、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値、 T 、とすれば、図4の便益の図形を $b(x,y)$ 軸に沿って、下方へ T だけ平行移動させれば、便益が求まることになり、それを図5に示す。便益が負となった旅行者は、バスのみを利用することになり、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、トリップ長の短い旅行者は、鉄道から、バスへのトリップに移ることがわかる。

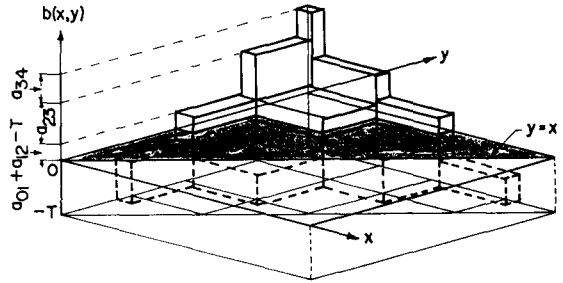


図5 $T > 0$ の場合の便益

以上、 $x \leq y$ のトリップについて考えて来たが、 $x > y$ 、すなわち、図1で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、今、バスの速度、 v 、列車速度、 V 、停車時間、 S 、乗り換え時間、 T 、が運行方向に依存せず一定だとすれば、 $b(x,y) = b(y,x)$ であり、 $y=x$ に關して対称となる。すなわち、1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行く。

一般に、分担の境界を、 $y = M(x)$ 、と表わすとすると、総便益、 TB 、は次式で求まる。

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

ここに、 $f(x,y)$ は地点 x, y の近傍単位長さあたり、単位時間内に発生集中するトリップ数である。一般に、 $f(x,y)$ は $x \leq y$ 、 $x > y$ の両方向で異なる。しかし、上で述べたように、便益が $y=x$ に關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、 $y \geq x$ のみを考えれば良い。

式(2)は次のように書き換えることも出来る。

$$TB = \int_0^L \int_x^L b(x,y) f_M(x,y) dy dx - T \int_0^L \int_x^L f_M(x,y) dy dx \quad (3)$$

ここに、 $f_M(x,y)$ は次のように定義される。

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

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)中第1項は、図4から直接計算することが出来る。それには、まず、 $A_{i-1,i}$ を次式で求める。

$$A_{i-1,i} = a_{i-1,i} \int_{z_{i-1} - \frac{x}{4} a_{i-1,i}}^L \int_0^{z_{i-1} + \frac{x}{4} a_{i-1,i}} f_M(x,y) dx dy \quad (4)$$

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項に相当するものが求まる。

最後に、駅建設費、鉄道運営費を含め、総便益、 BL 、を次式によって求めることが出来る。

$$BL = \sum_{i=1}^N (A_{i-1,i} - C_i) - T \int_0^L \int_0^L f_{\mu}(x, y) dy dx - C_0 - CT \quad (5)$$

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、運営以外に必要となる費用：路線建設、車両購入費等

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 、 B 、 μ 、駅配置点、 z_i ($i=1, 2, \dots, N-1$)である。

IV. 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、複雑に変化する所にある。しかし、今、 $y = \mu(x)$ が、 z_i 、 T に依存しないと設定することが出来るなら、 $f_{\mu}(x, y)$ 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良いことになる。この場合の最大化は、Fukuyama¹¹⁾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、路線に沿って駅の候補地 $1, 2, \dots, j, \dots, k, \dots, M-1$ を与え、各点を結ぶアークに、その2点間が1つの駅区間とした場合に、その区間から得られる便益、 $A_{jk} - C_k$ を対応させる(図6参照)。

そして、次に、点0から、最終点Mに到るルートの中から、便益が最大となるルートを選び出せば良い。ダイナミック・プログラ

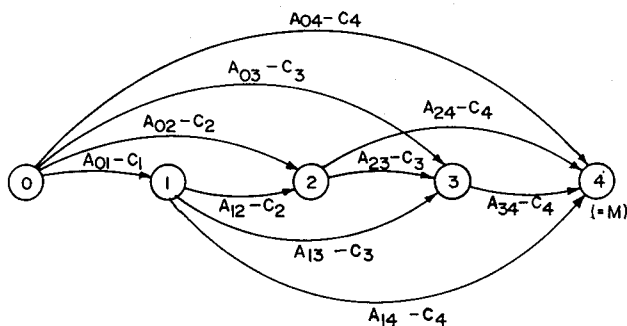


図6 ダイナミック・プログラミングに対応するグラフ

ミングの定式化には、まず、最適値関数、 $TB(k)$ を次の様に定義する。

$TB(k)$ = 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
この $TB(k)$ を用いれば、繰り返しルルは

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

となる。境界条件を、 $TB(0) = 0$ とし、 $k=1, 2, \dots$ の順に式(6)を計算して行けば、 $TB(M)$ 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 に到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、 $P(M)$ から順次遡って探して行けば良い。

以上の事を踏まえて、式(5)を最大化する次のアルゴリズムを考え得る。

- i) 初期駅配置、 z_i^0 ($i=1, 2, \dots, N$)を仮定する。
- ii) $\mu(x)$ の初期値となる、 $\mu^0(x)$ を求め、 $f_{\mu^0}(x, y)$ を決定する。
- iii) 前ステップで求めた $f_{\mu^{p-1}}(x, y)$ を用い、ダイナミック・プログラミングで最適駅配置、 z_i^p ($i=1, 2, \dots, N$)を求める。
- iv) $|z_i^p - z_i^{p-1}| < \varepsilon$ ($i=1, 2, \dots, N$)であれば、計算を終了し、そうでなければステップV)に行く。
ここにとは、 z_i^p が z_i^{p-1} に等しいかどうかを判定する際の誤差限界である。
- v) $z_i^{p+1} = z_i^p$ ($i=1, 2, \dots, N$)とし、 $\mu^{p+1}(x)$ を求め、 $f_{\mu^{p+1}}$ を決定する。
- vi) ステップiii)に戻る。

上記のアルゴリズムは、必ず収束すると言う保証はなく、又、収束したとしても、それが全域的な最適解とは限らない。全域的な最適解への収束の保証を高める為に、次の様な補助的アルゴリズムを導入する。

- 1) $T=0$ の場合の最適配置を、ダイナミック・プログラミングで決定する。
- 2) $T=T+\Delta T$ として以下のステップへ進む。
- 3) 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。
- 4) ステップ2), 3) を繰り返す。

上記ステップ1) の $T=0$ の場合には、式(4)の $f_{\mu}(x,y)$ は $f(x,y)$ で置き換えられ、式(5)の第2項は零となるので、ダイナミック・プログラミングで、全域的な最大値を求めることが出来る。次に、ステップ2) で、 T を ΔT だけ増加させるが、この ΔT が十分小さければ、 $T+\Delta T$ における最適解は、 T のそれよりもあまりかけ離れてはおらず、前述のアルゴリズムでの収束も速く、又、全域的最適解に収束していると予想される。

上記の手順をまとめたのが図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所で、計算を終えるようにしてある。明らかに、 T が増加して行けば、鉄道利用者は減少して行き、利用者の便益も減少する。従って、或る T に達した時、純便益が負となり、鉄道運営の意味を失なう状態が存在する。

V. 適用例 リオデジヤネイロ都市圏公社 (Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro)³⁾ は、リオデジヤ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、モデルの適用地域及び計画路線を示す。この地域は、リオデジヤネイロ市の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 km² であるが、その内36%は岩山で、市街化可能面積は約125 km² である。地区15は、北部の商業地区で、リオデジヤネイロの副都心とも呼ばれているマドウレイラ地区であり、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 km² 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、又、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

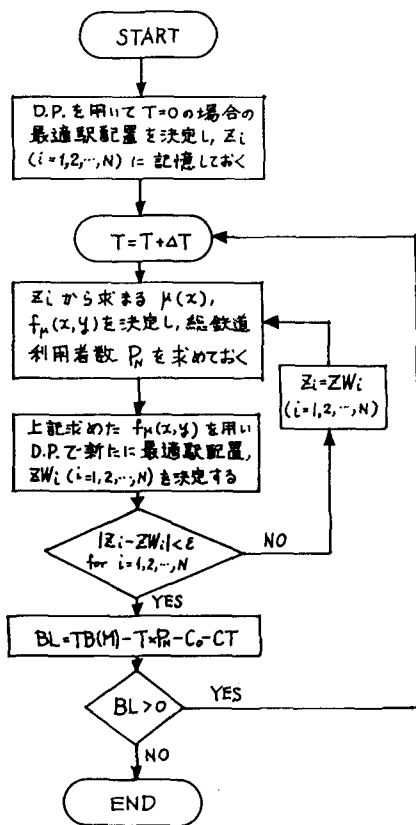


図7 最適駅配地決定フロー

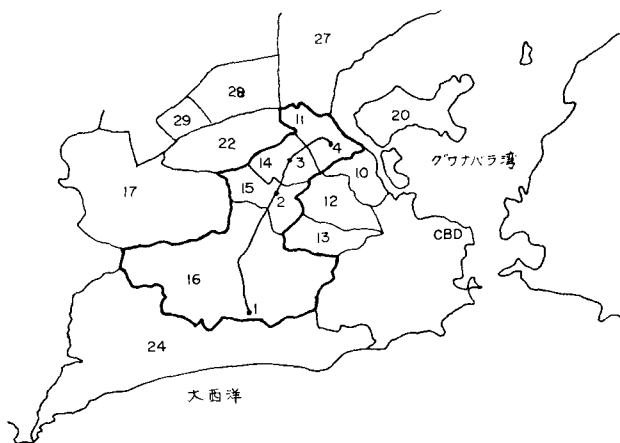


図8 モデル適用地域

致している。

Metrolife (前述の公社の略称) は、図8に示す、地区区分レベルでの1976年の調査から求めたOD交通量、及び、1989年の推定OD交通量、さらに、図9に示す、ゾーンレベルでの1976年の調査から求めたOD交通量を報告している。ここでは、地区区分レベルでの1976年、及び1989年の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。

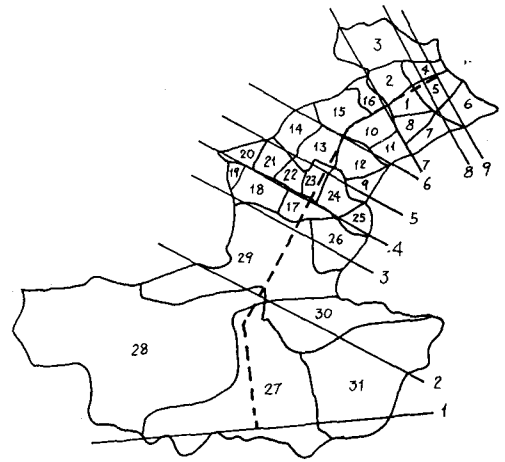


図9 ゾーン区分

$f(x,y)$ を求めるには、まず、路線を折れ線と近似し、図9に示すように、この地域を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、又、直線9より北東の区域は、区間12、及び、89にそれぞれ含まれ、又つの区域に属しているゾーンは、属する面積の多い区域に含まれるようにしている。区間に南から順に1から8迄の番号を付けることにし、その区間長、又、駅1からの累積距離を表1に示す。又、表2には、求めた $f(x,y)$ をしめし、 x と 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。

表1 区間特性

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
駅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 分布 (Trip/km²/Day)

DESTINATION	8	7	6	5	4	3	2	1
8	1198	991	3467	6673	3377	8490	24640	67754
7	338	2178	2579	6663	4387	5488	15802	
6	642	666	1615	4969	6473	6100		
5	618	2826	3865	14048	4884			
4	3036	6552	10460	24272				
3	4136	8243	12716					
2	3716	894						
1	2042							
ORIGIN	1	2	3	4	5	6	7	8

表3 対象地域内外に亘るトリップ (Trip End/km/Day)

	1	2	3	4	5	6	7	8
EO	7171	7171	22986	22986	11469	11469	38361	38361
EL	2053	2053	3002	3002	753	753	1191	1191

この地域と他地区との間の交通量は、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、駅1を通過するトリップを、ELは駅4を通過するトリップを示しており、それらは、それぞれ、駅1、4で発生集中するトリップとして取り扱っている。又、この地域を通過するトリップは1日あたり11640となり、このトリップは、駅1及び4に発生集中するものとして取り扱っている。図10に $f(x,y)$ の周辺分布及びEO、ELを加えた、各地点でのトリップ発生集中度を示す。

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/日及び2500時/日とかなり中のある値を取ると言う結果を得た。ここでは、人口密度と乗降すけ、図11に示すように駅の費用を決定した。

その他、計算に用いたパラメーターの値を次に示

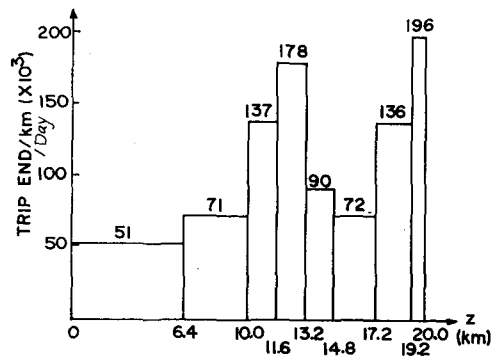


図10 地点発生集中トリップ密度

す。

$$CT = 67652 \text{ 時/日}$$

$$V = 80 \text{ km/hour}$$

$$v = 15 \text{ km/hour}$$

$$D = 40 \text{ 秒}$$

$$\Delta T = 5 \text{ 分}$$

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

$$M = 50$$

便益の計算は、 $x-y$ 平面を 400m の間隔の格子に分割して行ない、 $\mu(x)$ 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・プログラミングにおいても、路線を 400m の間隔に分割し計算を行なっている。これらの計算は、IBM1130を用いて行い、そのプログラム、フローチャートの詳細は、Junquillo²⁾ に記されている。

図12 は、式(15)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 の値と比較する為、 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、短い線の線が駅位置を表わしている。 T_r と書いてあるのは、図8の駅2, 3に対応する点で、常に駅であると考えている。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、78及び11の番号をつけている駅は、 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なったものであり、すべての駅での費用が0, 625, 1250, 2500 時/日の場合、及びこの費用が、その地点で変化する場合(図中の C_i)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る。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

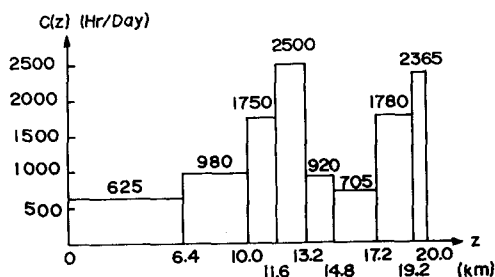


図11 各地点での駅建設費用

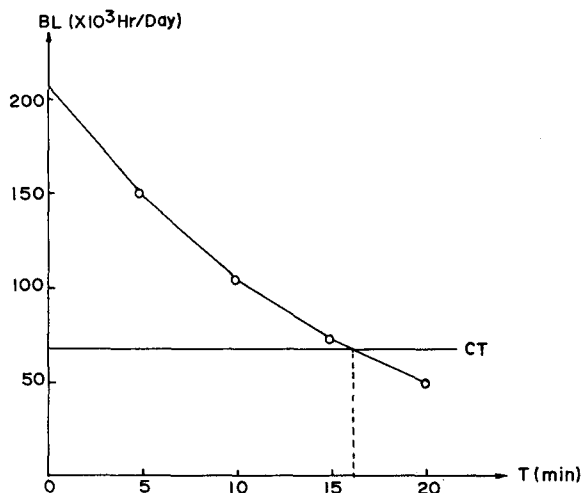


図12 Tの増加に伴う純便益の変化

T \ z	(km)											
(min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
0	1	2	3	4	5	6	7	Tr	9	Tr	11	12
5												
10												
15												
20												

図13 Tの増加に伴う駅配置の変化

$C_i \backslash z$ (Hr/Day)	(km)																
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20						
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tr	11	Tr	13	14			
625																	
C_i																	
1250																	
2500																	

図14 建設費用増加に伴う駅配置の変化(T=0)

に伴って容易に駅数が減少する。

VI. 結論 鉄道及びバスが平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又、駅の建設、運営費用が駅配置に及ぼす影響を明らかにした。

適用例を通じて、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ことを示した。又、駅建設、運営費用も、その増加に伴い、駅の数減少させ、駅間間隔を長くする。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と言う結果を得た。

乗り換え費用、駅諸費用の影響を受けない駅は、それら費用が増加しても、駅であり続けると言う意味で、他の駅に比べて、相対的に重要であると言えることが出来る。すなわち、いくつかの駅を段階的に建設して行く場合等、本モデルの感度分析を通じて、その優先順を決定する為の指針を得ることも可能である。

参考文献

- 1) Masaharu Fukuyama, "Optimal Station Location For a Two Hierarchy Transit System," Proceedings of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Toronto, June, 1981
- 2) Wilbert Ribeiro Junquillo, "Otimização do Espaçamento entre Estações de Sistemas Ferroviários Urbanos de Passageiros," Tese de Mestrado, IME, April, 1981
- 3) Companhia de Metropolitano do Rio de Janeiro - Metrô, "Plano Integrado de Transports," SAPSA, Rio de Janeiro, Novembro, 1977
- 4) 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", 土木学会論文報告集 第259号・1977年3月
- 5) S.C. Wirasinghe, "Nearly Optimal Parameters for a Rail/Feeder-Bus System on a Rectangular Grid," Transp. Res.-A Vol. 14A Pergamon Press Ltd. 1980