【土木計画学研究・講演集 No.12　1989年12月】

放射環状都市高速道路網の規模・料金の同時決定モデル

Optimal Expanding of, and Pricing to Urban Expressway Network under Constraints

藤井直人*・山田正人**・明神　証**
By Naoto FUJII, Masahito YAMADA and Sho MYOJIN

A condition of optimal expanding of, and pricing to urban expressway network under constraints are discussed. The network consists of one ring road with four radial roads interconnected at city center. Constraints are concerned with the twoes; the balance of cost and revenues and traffic capacity of the network. Under some traffic conditions, it is shown that optimality is conditioned upon the radius of ring road which keeps the balance of the peaks of traffic volume at junctions.

1. はじめに

わが国の都市高速道路においては、独立採算制のもとで均一料金制もしくは区間料金制が採用されている。高速道路の建設および管理のための費用を前提に、料金水準が定められるわけである。この前提の下で、網の規模と料金水準とを互いに独立に決定することはできない。建設及び管理のための費用は規模の関数であり、一方で、料金収入は料金水準と高速道路利用交通量との積で与えられるから、収支均衡条件によって、規模と料金水準との間に相互依存関係があるためである。ちなみに、高速道路利用交通量は料金水準には勿論のこと、網の規模にも依存することは明かであろう。こうして、網の規模と料金とを決定する問題は、それらの同時決定モデルとして記述されることが必要である。

* 学生会員　岡山大学大学院工学研究科
** 正会員　岡山大学工学部土木工学科
（〒700　岡山市津島中３－１－１）

これまでわが国で、この問題に対して２通りのアプローチがなされている。１つは佐佐木らによるＯＲ的もしくは交通工学的とでもいうべき研究[1]及びその後の展開[2]、他の１つは厚生経済学的であって山田によるモデル[3]および明神らによるその数学的検討[4]である。後者は１車種、混雑費用なしの静学モデルであり、有意義な理論的帰結を示しているが、網の形や交通容量、交通の発生や集中の空間分布が具体的に示されているわけではない。これに対し、前者においてはそれらの具体形がモデルに明示されており、高速道路網上で交通渋滞を生じさせないような均一料金の水準と圏域とが示される。

ここに報告するものは前者のアプローチに属するものであって、文献2)のモデルに大略つぎの２つの拡張を加えたモデルに関する若干の計算結果である。

１）　網の形　文献2)の４放射線に１本の環状線を加えた。

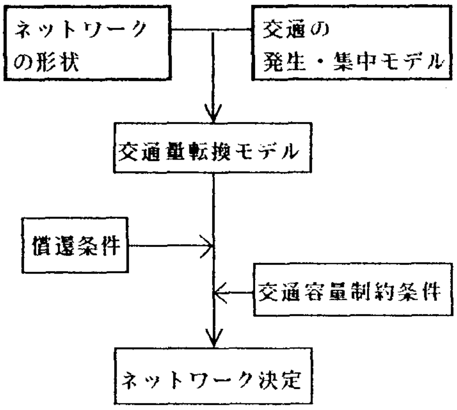
２）　ＯＤ交通量の分布　文献2)の１点（都心）集

中分布をmany-to-manyの分布でおきかえた。

この拡張の主な目的は、環状線の大きさ（半径）が、モデル内の他の諸条件によってどのような影響をうけるかを知ることにある。

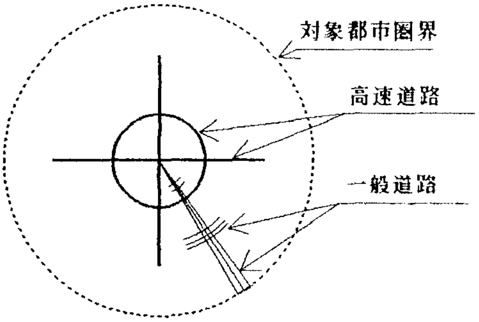
2. モデル

モデルの骨格をフローチャートによって図－1に示す。モデルは、ネットワーク形状、交通分布および交通量転換の3つのサブモデルに2つの制約条件すなわち償還条件および容量制約条件が加わって構成されている。以下、それぞれの概要を述べる。



図－1　モデルのフローチャート

［1］　ネットワークの形状



図－2　ネットワークの形状

全体として一般道路と高速道路から構成されている。一般道路網は、都心を中心として放射方向、環状方向にそれぞれ高密に配置されているものとする。高速道路網は、同じ都心に中心をおく4本の放射線と1本の環状線からなるものとする。放射線は都心において互いに直角をなし、また流出入ランプの位置は特定せずしたがって任意の位置で流出入できるものとする。一般道路の配置形状および流出入ランプ位置に関するこれらの仮定は、後述する交通量転換サブモデルの中でおこなう転換率の計算に関連する便宜的なものである。ただし、このことによる結論に対する影響は本質的なものではないと思われる。図－2に形状の概略を示す。

［2］　交通の発生・集中モデル

対象圏内の任意の2地点間の交通量分布はいわゆる重力モデルに従うものとする。すなわち

$$g(r_1,\theta_1;r_2,\theta_2)=\frac{\alpha\{f(r_1)\cdot f(r_2)\}^{\beta}}{\{d(r_1,\theta_1;r_2,\theta_2)\}^{\gamma}} \qquad (1)$$

ここに、

q：極座標で表わした2つの地点（r_1, θ_1）、（r_2, θ_2）の間の交通量

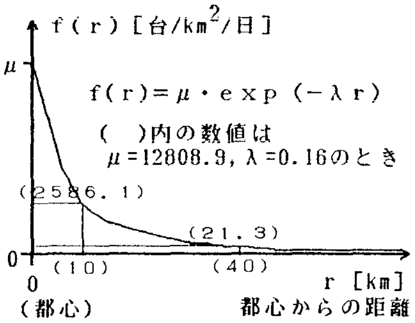
d：2地点（r_1, θ_1）、（r_2, θ_2）の間の直線距離

f（r）：都心からの距離rにおける交通の発生、集中の大きさを表わす関数

α, β, γ：定数

本報告においてはとりあえず関数f（r）を次式で仮定する[5)]。

$$f(r)=\mu\cdot\exp(-\lambda r) \qquad (2)$$



図－3発生集中ポテンシャル関数

ここに

μ, λ：定数

関数f（r）は単位期間（たとえば、1日あるいは償還の全期間など。本報告では1日を想定している。）について、単位面積当り交通の発生・集中の

密度の大きさを表わす。したがって、式（２）を対象圏全域について積分した量は、期間中の総発生、総集中交通量に等しい。ちなみに、式（２）はθを含まないから、同心円上の発生、集中の密度は一定である。

本報告はとりあえず式（１）で$\gamma=0$とおいた場合について行う。所与の関数ｆ（ｒ）に対して、このケースでは、$\gamma\neq0$の場合に対して、長距離交通が相対的に多くなる。

［３］　交通量転換モデル

わが国の都市高速道路においてよく用いられてきたいわゆる時間比転換率式のうち、６乗式を仮定する。[6]

$$P=\frac{1}{1+T^6}-0.05 \qquad (3)$$

ここに

Ｐ：高速道路への転換率

Ｔ：時間比

時間比は、一般道路だけを利用する場合の最短時間経路所要時間に対する高速道路利用の場合の最短時間経路（アクセス、イグレスの一般道路を含む）所要時間の比である。ただし、時間比は高速道路の通行料金を含む次式によって与えられるものとする。

$$T=\frac{Te+F/\delta}{Ts} \qquad (4)$$

ここに

Ｔｅ：高速道路利用時の所要時間

Ｔｓ：一般道路利用時の所要時間

Ｆ：高速道路通行料金

δ：時間価値

上式のF/δは通行料金の時間換算値である。

それぞれの走行速度を次のように仮定する。

高速道路に対して

$$V(Q)=V_0-kQ \qquad (5)$$

ここに

Ｑ：高速道路上の交通量

V_0，ｋ：定数

モデルの性質上、Ｑは高速道路の断面の位置により一般に異なることは明らかである。

一般道路に対して[7]

$$v(r)=v_0-a\cdot\exp(-br) \qquad (6)$$

ここに

ｖ（ｒ）：都心から距離ｒにおける速度

v_0，ａ，ｂ：定数

高速道路利用および一般道路利用の経路選択ルールはつぎのとおりである。まず、一般道路網上の２地点間の走行経路は、放射方向と環状方向との組合せからなる経路（無数にある）のうち最短時間の経路が選ばれる。高速道路利用の経路はアクセス、イグレスおよび高速道路上の経路からなる。アクセスは最短時間アクセスが選ばれる。イグレスについても同じである。高速道路上の経路はいうまでもなく最短時間経路が選ばれる。なお、式（５）に示すように、高速道路上の走行速度はその地点の交通量の関数であるから、転換率は収束計算を通じて求められる。

式（６）は、同心円上の速度が一定、交通量の影響無視という２つの点で奇妙である。それにも関わらずこれを借用し仮定したのはつぎの２つの理由による。１つはそしてこれが最大の理由であるが、計算の便宜のためである。本報告で仮定したような一般道路網の形状に対して、任意の地点の走行速度をその地点の交通量の関数と仮定すると、収束のための計算の困難さは想像をこえる。もう１つは幾分もっともらしく思われるのであるが、一般道路の走行速度は、高速道路のそれに比べ、交通量に対して鈍感である（信号制御による影響が大きい）との判断にたって、とりあえず交通量の直接の影響を無視したものである。

［４］　償還条件

総費用は高速道路の延長に比例するものとする。

$$C(R,R_b)=4cR+2\pi cR_b \qquad (7)$$

ここに

Ｒ：放射線の半径（都心からの長さ）

R_b：放射線の半径

ｃ：単位長当りの費用

いうまでもなく、上式の右辺第１項は放射線の費用、第２項は環状線の費用である。償還条件は、総料金収入が総費用を下まわらないことを要求するものである。式（７）はいわゆる固定費用を無視している

点および都心からの位置によらず単純に延長に比例させている点で大ざっぱなものである。

［5］ 交通容量制約条件

高速道路上の全ての断面において、交通量が交通容量をこえないことを要求する。高速道路は片側2車線とし、これに相当する交通容量が仮定される。

［6］ 解

放射線半径（均一料金圏の半径）、環状線半径および料金水準に関する実行可能領域が見いだされる。ここでは、転換交通量（高速道路利用台数）が最も多い点をもって解とする。ただし、本報告が仮定したようなモデルにおいて、転換交通量最大化基準が、料金収入最大ということ以外にどのような理論的意味をもつのか必ずしも明らかでない。[8]

3．計算結果および若干の感度分析

［1］ 1つの計算結果と考察

表－1 パラメータの値

ﾊﾟﾗﾒｰﾀ	値	備　考
μ	12608.9 台/km^2/日	発生集中
λ	0.16 /km	ポテンシャル関数
α	7.88×10^{-8}	重力モデル式
β	1.0	
γ	0.0	
	316×10^4 万台	総発生交通量
V_0	70 km/h	高速道路速度式
k	0.003 (km/h)/(台/h)	
v_0	30 km/h	一般道路速度式
a	10 km/h	
b	0.15 /km	
c	135.6×10^4 円/km	単位長あたり費用
	87.5×10^3 台/日	高速道路交通容量
δ	25.8 円/分	時間価値

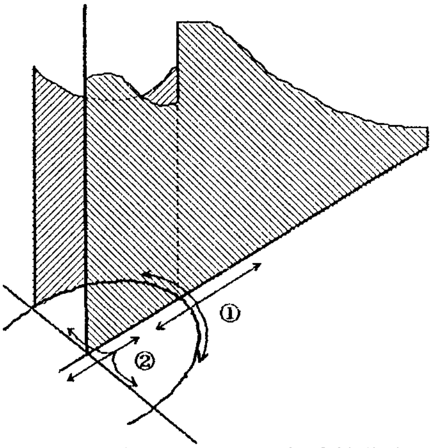
表－1に示すパラメータの値をもちいた計算結果について述べる。ただし、表－1の値は、重力モデル式のパラメータ値を除いて、文献2)からの借用である。

解は次のとおりである。

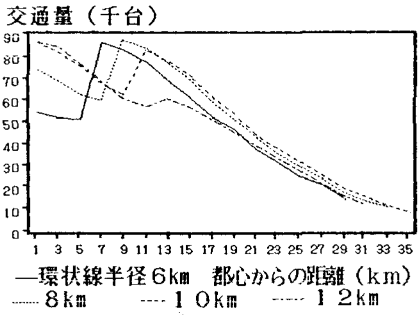
放射線半径（均一料金圏半径）　３６ｋｍ
環状線半径　１０ｋｍ
料金水準（車種区分は１つ）　６９０円／台

しかしながら、本モデル分析の目的は、単に転換交通量最大化規準にもとづくこのような最適解を求めることにあるのではなく、解の性質を示すことにある。今回の関心は特に環状線の半径にあるので、主としてこれについて述べる。

まず、高速道路上の交通量の分布と環状線半径との関係について述べる。図－4は放射線および環状線上の交通量の分布を模式的に示している。放射線上の交通量分布は2つの点でピークを示す。都心と環状線北側であって、それぞれから外方に向かって単調に減少することは勿論である。環状線上の交通量は放射線との交点が最大、2交点の中央で最小である。



図－4　高速道路上の交通量分布



図－5環状線半径による分布形の変化

主たる興味は放射線上の2つのピークと環状線半径との関係にある。2つのピークは、他の諸条件を一定とすれば、環状線の半径によって変わる。図－5はこの変化を示したものである。環状線半径の増加とともに、2つのピークを構成する交通流の向き

が図－４の２地点にそれぞれ示されている。環状線半径の増大とともに、環状線内側における交通の発生・集中の総量が増加し、図－４の都心部ピーク地点に示される向きの交通の増加をもたらすのに対し、環状線外側においてはこれと逆向きの変化が起こるのである。

つぎに、さきに求めた環状線半径の解（１０ｋｍ）に対し、放射線上の２つのピーク交通量は相等しくなることが示された。図－５の半径１０ｋｍに対する交通量分布のグラフから大略このことが観察されるであろう。すなわち、本モデルで定義する最適化規準のもとでは、最適ネットワーク上で、放射線上のピーク交通量は均等化される。いうまでもなく、そのときのピーク交通量は交通容量に等しい。かりに、高速道路上の全ての地点で交通量が丁度その容量に等しく分布すれば、総転換交通量は極めて大きくなる。転換交通量最大化規準のもとでの最適状態において、ピーク交通量が均衡することは当然といえようか。

パラメータ値が変化すれば、高速道路上の交通量分布が変わり、従って放射線上のピーク交通量が均衡を失う。均衡を回復するために環状線半径を伸縮することが要求される。このようなプロセスの概略を見るために感度分析を行ったので以下に述べておく。

［２］　感度分析

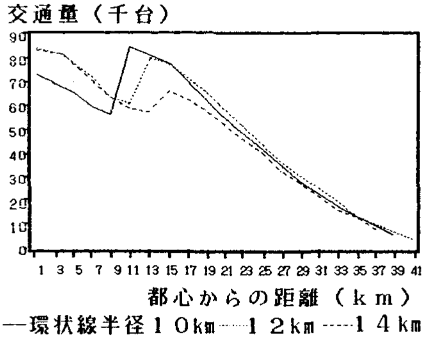
まず、交通の発生・集中に関する重要なパラメータであるλおよび総発生交通量に対する分析結果について述べる。

1.　λ

λの減少は環状線半径を増大させる。

λが減少すると周辺部の交通発生・集中が相対的に増加するために、環状線外側における放射線上のピーク交通量が都心部のそれに対して相対的に増大する。２つのピーク交通量の均衡を回復させるために、環状線の半径を大きくすることが要請される。図－６はλ＝0.13に対する放射線上の交通量分布である。２つのピーク交通量の均衡が実現するのは環状線半径１２ｋｍの近傍である。

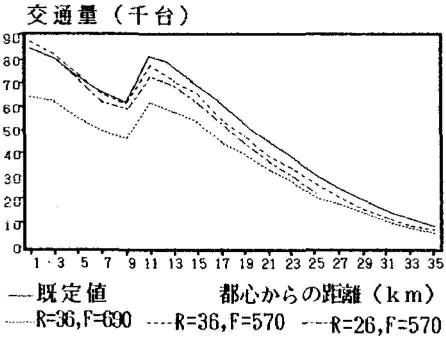
つぎのことに注意しておく。式（２）の対象圏全域にわたる積分は総発生（集中）交通量を与える。一方、総発生交通量は別途与えられる一定値のままに保たれるから、対象圏半径を一定とすれば、μを調整して積分値をこれに一致させなければならない。この為に、μはλの変化と同じ向きに調整されることになる。このケースのようにλを減少させるとμも減少し、その結果、環状線半径の増大が加速される。



図－６λを減少させたときの交通量分布

2.　総発生交通量

これの減少は放射線（均一料金圏半径）半径と環状線の半径の減少さらに料金水準の低下をもたらす。このことは定性的にももっともらしい。ちなみに、総発生交通量がゼロであれば、すべてゼロであることは明かであろう。図－７は、環状線の半径をあえて１０ｋｍの固定した場合放射線半径の減少および料金水準の低下を通じて放射線上の交通量が均衡に近づくプロセスを示している。



図－７総発生交通量の減少による影響

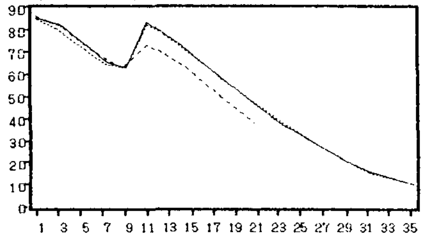
放射線半径の減少は旅行経路のより長い部分を放射線に依存する長トリップの割合を相対的に減少させる一方、料金水準の低下にともなう転換率の上昇は短トリップにおいて相対的に大きい。この結果、放射線上のピーク交通量は環状線外側において相対

的に小さく、これを均衡させるために、環状線半径は小さくなることが要求される。

つぎに、関心事の１つである時間価値についてみてみよう。

3. 時間価値 δ

時間価値の低下は、定性的には高速道路利用便益の減少を通じて転換率の低下につながる。収支均衡を回復するために転換交通量の増加をもたらすような料金引き下げを行うと同時に、総費用を節約するために、放射線半径および環状線半径を小さくしなければならない。図－８は、環状線半径を敢えて一定に保ったままでδを低下（２５．８円／台分から２０．０円／台分へ）させたときの放射線上の交通量分布の変化状況を示す。放射線上の交通量分布に関する限り料金を５４０円（もとの６９０円から）に下げれば変更前と同じ分布を保つことができる。



図－８時間価値δの減少による影響

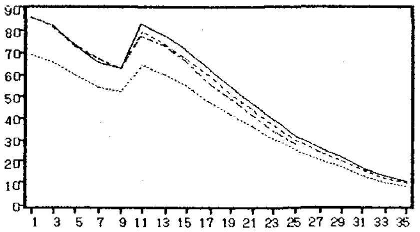
しかしながら、放射線半径が以前のままでは、収支が均衡しないので放射線半径を小さくする必要があるのである。放射線半径２２ｋｍ、料金５４０円に対する放射線上のピーク交通量は、敢えて固定してある環状線半径を小さくすることによって均衡を達成されるであろう。なお、このケースに関する限り

$$F/\delta = 690/25.8 \fallingdotseq 540/20.0 \fallingdotseq 27.0$$

とほぼ一定値に保たれている。

4. 高速道路の自由速度 V_0

V_0を７０ｋｍ／ｈから６０ｋｍ／ｈに低下させ、かつ敢えて環状線半径を一定に保った場合の放射線上の交通量分布を図－９に示す。放射線半径２６ｋｍ、料金水準５６０円が示されているが、２つのピーク交通量を均衡させるための調整がさらに要求される。



図－９高速道路の自由速度V_0の減少による影響

４．おわりに

４放射線１環状線からなる都市高速道路網を想定したモデル分析を試みた。特に環状線半径が放射線上の転換交通量分布のピークを均衡させるような点に定まることが示されたことが１つの収穫であると考えている。ただ、これは、所与の条件のもとでの転換交通最大という規準からすれば、むしろ自明であろう。感度分析については、例えば、時間価値δの変化に対して、F／δが不変であるようなメカニズムがモデルに内臓されているかも知れないが、なお厳密な検討をまちたい。さきに示した４パラメータ以外についても、感度分析を行ったが、煩雑な記述を重ねることになる恐れがあるのでここには述べない。

本文中に述べたように、このモデル分析は基本的ないくつかの点および計算に用いたパラメータ値に関して文献2)に多くを負っている。記して謝意としたい。ただし、本報告にもし不十分な点や誤りがあれば、それらは本報告の著者らに責任がある。

参考文献：

1)佐佐木 綱:阪神高速道路網における均一料金圏の決定,高速道路と自動車,vol.ＸⅠ,No.２,pp.19-29,1968.
2)佐佐木 綱,井上矩之他:都市高速道路の利用便益に着目した最適料金体系の決定に関する研究,昭和56/57年度文部省科学研究費研究成果報告書,1983.
3)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.ＸⅠ,No.９,pp.17-32,1968
4)明神 証,浅井加寿彦: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.25,No.4,pp.27-36,1982.
5) 1)2)からの借用である。
6)例えば、阪神高速道路公団:転換率式に関する実証的調査研究業務報告書,1976.
7) 2)からの借用である。
8)例えば4)を参照。