

有料道路の最適料金決定に関する一考察

松 井 寛・伊豆原 浩 二

土 木 工 学 科

(1973年9月11日受理)

A Study on Determining the Optimal Toll for Toll Road

Hiroshi MATSUI and Koji IZUHARA

Department of Civil Engineering

(Received September 11, 1973)

In the case of selection of a toll road, the toll value has an important effect on our route selection behavior. That is, traffic volume on a toll road is greatly influenced by toll value.

In this study from the point of view of this change on traffic volume, the optimal toll value is determined by maximizing the total revenue and by minimizing the total travel time on the road network. This model is led from the traffic assignment theory by maximizing entropy proposed by the authors.

It is important application that the use of this model is possible on wide road networks contained toll roads. And by this model we are able to investigate the efficient use of roads.

1. まえがき

最近の高速国道，都市高速道路，一般有料道路，一般自動車道などの有料道路の建設はめざましく増加し，それぞれにわが国の道路網の一翼を担っている。現在の有料道路制度が昭和31年日本道路公団設立として初めて定められ，有料道路ができるようになって以来わずか16年余しかたっていないにもかかわらず，その規模においても，機能の面においても，すでにわが国の道路事業の主役を占めているといっても過言ではない。

サービス水準の低い一般道路よりも，完全舗装で，安全かつ快適なドライブを楽しむことができるとか，時間短縮ができるという高水準のサービスを提供する有料道路を利用するのに，通行料金自体—その水準は別として—を支払うことに抵抗をおぼえる人はほとんどないであろう。すなわち利用者は有料道路が経済的な便益（安全性とか快適性などをも含めて）において一般道路とは異なり，鉄道・船舶と同様な経済財として認識するようになってきているのが現状であるといえる。しかしながら，通行料金は利用者にとっては抵抗値と感じられるの

は当然のことだろう。利用することによる便益よりも通行料金の方が高くなれば有料道路の利用者は減少してその存在価値は小さくなるだろうし，逆に通行料金の方が安いとなれば利用者は多大となり交通混雑を引き起こすことにもなりかねない。それゆえに有料道路にはそれに見合う適正な通行料金を設定しなければならない。この適正な通行料金決定方法にはいろいろな考え方があるであろうが，本研究では通行料金が利用交通量に大きく影響を及ぼすことに着目して，道路網上の交通量配分手法を利用することにより，有料道路における適正な通行料金決定方法について一考してみることにする。

2. 通行料金に対する考え方

道路は本来「無料」であるべきか「有料」であるべきかという問題については議論の余地がある。「無料」にすべきであるという主張の根拠は，街路や一般道路がガソリン税をはじめとする道路関係税を財源として建設・維持管理されているということに基づいており，「有料」にすべきという考え方の根拠は，道路整備の緊急性，社会資本の先取り，経済的な便益性を考えることに基

いている。基本的には道路は「無料」という考え方が、わが国に限らず一般的のようである。しかしながら、有料道路に投資された資本は莫大な額にのぼると共に、一般道路とは異った高水準の交通サービスを提供する施設であるがゆえに現実には或る期間内は通行料金という負荷が課され、しかる後には無料公開されることになっている。

現在の有料道路の有料制度は、用地費を含む建設費、料金徴収期間の管理維持費などの道路費用をすべて償うように決定するという、いわゆる個別償還主義をとっている。この方法は「平均費用価格設定」原則に基づいており、公共料金の決め方に広く採用されている方法で、要される総費用を利用者間に分割課料するのである。この場合、総費用と総収入との一致という点で経済性が確立されている。しかし、有料道路が他の有料道路と独立な場合には上記の方法でもよいが、高速道路網の整備拡大、新規有料道路の建設などにより有料道路が併設されるような場合には、現実に要した費用は新設の方が大となるために通行料金は高くなる。すなわちほとんど同水準の交通サービスを提供するのに通行料金が著しく異なる一極端な場合には無料と有料とになる一という矛盾が生じてくる。ゆえに上記の方法のかわりに、各路線を一括して通行料金を計算するという、いわゆる料金プール制がある。これは個別償還主義に対する総合償還主義ともいえる考え方であるが、この場合でも償還後の無料開放を前提として通行料金を決定するという考え方にはかわりはない。

これに対して、道路の効率化による最適利用、交通サービスの均等化などという観点からの通行料金設定方式という考え方が最近いわれるようになってきた。これは **G. J. Roth** によって提案された「限界費用価格設定」原則に基づく「利用者費用価格」という考え方である。¹⁾ この考え方の特徴は「混雑費」(混雑税ともいう)という概念を用いることである。すなわち道路利用者の自動車交通の限界価値と社会的限界費用とを一致させることが望ましく、そのためには社会的限界費用と私的限界費用(時間費用などの利用者個人に関する費用)との差に等しい混雑税(道路の通行料金)を利用者に課す。その結果所与の交通容量に対して交通需要を適正に押え均衡化させると共に総費用をも回収しえて、道路利用の効率化を図ることができる。この考え方は交通量が比較的多く、社会的限界費用が増大する場合によく適合しうと思われる。

以上有料道路の通行料金に対する大体の考え方を述べたが、この考え方は一部区間に有料道路を含む道路網全体での最適利用にまで拡大しうると考える。この場合には一般道路の最適利用をも含むことになり、より一般的

であるともいえる。しかし対象道路網全体の効率を示す評価基準を設定する必要がある。その評価基準として、**M. J. Beckman** は、「平均費用価格設定」原則に基づくものに対して「料金収入最大化」を、「限界費用価格設定」原則に基づくものに対して「総走行時間最小化」を提案している。²⁾ そこで、この方法に交通量配分理論を応用することにより、広範囲な道路網を対象とする場合でも配分交通量(需要交通量)との関連性を持った最適な通行料金を決定できると考える。以下にその定式化および計算例について述べる。

3. モデルの定式化

利用する交通量配分理論として著者等が提案した確率最大化配分法を取り上げる。この配分理論は次のように定式化されている。³⁾

いま或る l 本のリンクからなる道路網が構成されており、所定の **OD** 交通量が与えられ、各 **OD** 間には経路がただか n 本まで指定されているものとする、リンク h ($h=1, 2, \dots, l$) 上の走行時間 T_h がそのリンク上の交通量の関数として

$$T_h = f_h(\sum_r \sum_k \delta_r^k y_r^k) \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる場合には、目的関数 R は

$$R = \gamma \sum_h \sum_r \sum_k \delta_r^k y_r^k f_h(\sum_r \sum_k \delta_r^k y_r^k) + \sum_r \sum_k y_r^k \log y_r^k \dots\dots\dots(2)$$

ここで γ : 定数

y_r^k : k ($k=1, 2, \dots, q$) なる **OD** の経路 r ($r=1, 2, \dots, n$) に配分される交通量
 δ_r^k : k なる **OD** の経路 r がリンク h を含むとき 1, 含まないとき 0 の値をとる定数

と表わされ、 $\sum_r y_r^k = S_k$ (S_k : k なる **OD** 交通量) なる条件の下で R を最小化することにより、確率的に最も起り易い交通量分布パターンが決定されることになる。

そこで、この理論を有料道路を含んだ道路網に適用してみる。有料道路と一般道路とを比較したときの走行時間差および便益に着目すれば次のようになる。

有料道路であるリンク m ($m=1, 2, \dots, l' < l$) の通行料金を C_m 、そのときのリンク走行時間を T_m 、リンク m を一般道路とするときのリンク走行時間を T とすれば

$$T - T_m = \delta_r^k \cdot C_m / a_m \dots\dots\dots(3)$$

ここで a_m : 単位時間あたりの便益費

$m\delta_r^k$: k なる OD を持つ経路 r がリンク m を含むとき 1, 含まないとき 0 の値をとる定数

となる。よって(1)式の T_h に相当する式として

$$T = f_m(\sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k) + m\delta_r^k C_m / a_m \dots\dots\dots(4)$$

が得られ、目的関数 R' は次のようになる。

$$R' = \gamma [\sum_h \sum_r \sum_k h\delta_r^k y_r^k f_h(\sum_r \sum_k h\delta_r^k y_r^k) + \sum_m \sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k \{f_m(\sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k) + m\delta_r^k C_m / a_m\}] + \sum_r \sum_k y_r^k \log y_r^k \quad (h \neq m) \dots\dots\dots(5)$$

この R' を

なる条件の下で最小化することにより配分パターンを決定できる。このときの配分交通量は次式で与えられる。

$$\sum y_r^k = S_k \dots\dots\dots(6)$$

$$y_r^k = f(T_h, C_m)$$

$$= \frac{\exp[-\gamma \{ \sum_h h\delta_r^k (f_h + \sum_r \sum_k h\delta_r^k y_r^k f'_r) + \sum_m m\delta_r^k (f_m + \sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k f'_m + C_m / a_m) \}]}{\sum_h \exp[-\gamma \{ \sum_h h\delta_r^k (f_h + \sum_r \sum_k h\delta_r^k y_r^k f'_r) + \sum_m m\delta_r^k (f_m + \sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k f'_m + C_m / a_m) \}]} \cdot S_k \dots\dots\dots(7)$$

よって、このときの料金収入最大化による通行料金の決定は、(1), (4), (6), (7) 式の条件の下で

で求めた走行時間を用いる。

$$\sum_m \sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k C_m \dots\dots\dots(8)$$

7) 上記をくり返して、最終的に得られた各経路の走行時間を用いて配分交通量を決定し、そのときの料金収入と総走行時間を得る。

を最大化する C_m を求める問題となる。

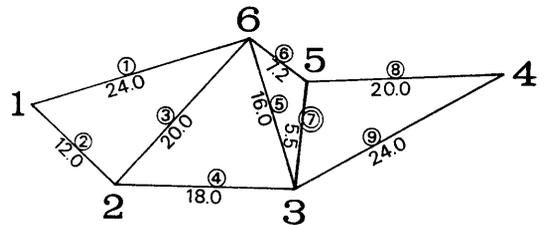
8) 料金 C_m を変化させて手順 1) に戻る。

一方、総走行時間最小化による料金決定の場合には、(1), (4), (6), (7) 式の条件の下で

計算例(I)として、図-1に示すような仮想道路網と

$$\sum_h \sum_r \sum_k h\delta_r^k y_r^k f_h(\sum_r \sum_k h\delta_r^k y_r^k) + \sum_m \sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k f_m(\sum_r \sum_k m\delta_r^k y_r^k) \dots\dots\dots(9)$$

を最小化する C_m を求める問題となる。



- ① LINK NUMBER
- 24.0 LINK TRAVEL TIME
- ⑦ TOLL ROAD

Fig. 1. Road Network, Link Travel Time

Table I. OD Volume on Fig.1. Vehicles per day

| OD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|---|---|-------|-------|-------|-------|
| 1 | * | * | 1,700 | 400 | 700 | 1,100 |
| 2 | | * | * | 800 | 1,500 | 1,300 |
| 3 | | | * | 1,200 | * | 1,400 |
| 4 | | | | * | * | 900 |
| 5 | | | | | * | * |
| 6 | | | | | | * |

4. 計算例

計算方法は次のようである。

- 1) γ を仮定 (実際の道路網では交通条件, 交通事情などによって決まる) し, 料金 C_m を固定する。
- 2) 最初の交通量 0 の状態での f_h, f'_h, f_m, f'_m を求め, 配分率を計算する。
- 3) その配分率によって OD 交通量, リンク交通量を求める。
- 4) 3) のリンク交通量を用いてリンク走行時間を修正する。
- 5) 経路 k の走行時間を修正する。
- 6) 手順 2) に戻り, 最初の走行時間かわりに 5)

表一で与えられるOD交通量を用いることにする。それぞれのODについて最短経路を含めて3本の経路を考え、この経路は終始固定されているものとする。この道路網における有料道路区間はリンク7として、この区間における最適料金を求めることとする。リンク走行時間はリンク交通量の関数として次式で与える。

$$T_h = a_h Q_h + b_h$$

ここで T_h : リンク h ($h=1, 2, \dots, 9$) の走行時間(分)

Q_h : リンク h の交通量(台/日)

a_h, b_h : リンク h の道路条件(延長, 巾員など)によって決まる定数(表一2)

Table II. Ualue of a_h, b_h on Fig.1.

| LINK | a_h | b_h |
|------|---------|-------|
| 1 | 0.0030 | 24.0 |
| 2 | 0.0015 | 12.0 |
| 3 | 0.0025 | 20.0 |
| 4 | 0.00225 | 18.0 |
| 5 | 0.0020 | 16.0 |
| 6 | 0.0009 | 7.2 |
| 7 | 0.00135 | 5.5 |
| 8 | 0.0025 | 20.0 |
| 9 | 0.0030 | 24.0 |

単位時間あたりの時間便益を11(円/分)として、他の便益は計算の簡略化のために無視した。料金は0円から始めて10円単位で一応300円まで計算した。

計算結果として、料金収入額と通行料金との関係を示したのが図一2であり、料金収入額を最大にするときの料金は、 $\gamma=0.1$ のとき160円、 $\gamma=0.2$ のとき100円、 $\gamma=0.3$ のとき70円となった。次に総走行時間と通行料金との関係を図一3に示す。総走行時間を最小にする料金は、 $\gamma=0.1$ のとき260円、 $\gamma=0.2$ のとき100円、 $\gamma=0.3$ のとき60円となっている。図一2、図一3を比較してみるとわかるように、料金の影響は料金収入最大化に対する方が総走行時間最小化に対するよりも敏感である。これは(8)式、(9)式の相異からわかるようにある程度納得のいく結論である。なぜならば、料金収入最大化

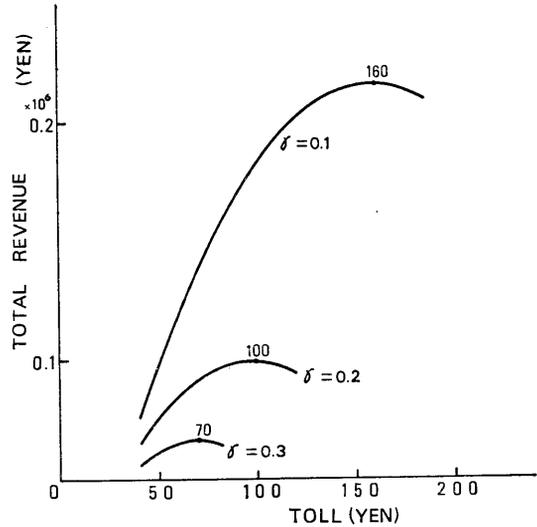


Fig. 2. Total Revenue-Toll relationship for maximizing Total Revenue on Fig.1

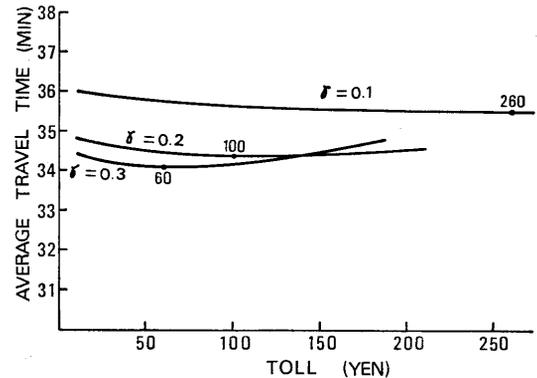


Fig. 3. Average Travel Time-Toll relationship for minimizing Total Travel Time on Fig.1

(8) 式を最大化する) の場合には直接に料金の項が入って来るので影響を及ぼすのが大であるのに対して、総走行時間最小化((9) 式の最小にする) の場合には直接には料金の項が入っておらず、料金は交通量を変動させている一つのパラメータ的役割を持っているに過ぎないからであるといえる。次に上記の影響の大きさを考慮して、料金収入最大化の場合について γ と料金の関係を調べたところ図一4のようになっており、 $\gamma=0.1$ のときの160円から $\gamma=0.9$ のときの50円と安定化している。この図からわかるように、 γ と料金の関係はかなり密接な関係にあると思われる。 γ は交通条件、交通事情などによって決定される係数であるが、実際の道路網にこのモデルを適用するときは γ の値を慎重に決定しなければならないことがわかる。

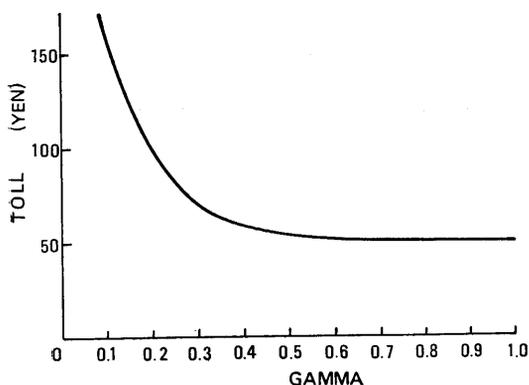


Fig. 4. Toll-Gamma relationship for maximizing Total Revenue on Fig.1

次に道路網をかえて計算を試みたのであるが、結果は傾向がほとんど同様であったし、⁴⁾ 全体のOD交通量の変化と料金、総走行時間との関係調べるためにOD交通量を γ 倍した場合について計算したところ、 $\gamma=0.1$ で料金収入は1.53倍、総走行時間は1.61倍になり、 $\gamma=0.5$ で料金収入は1.45倍、総走行時間で1.62倍となった。

今までは仮定の道路網上での計算であったが、計算例Ⅱ)として実際の有料道路を含めた道路網に適用した場合について述べよう。この場合最も簡単な例としての道路網図を図-5に示す。ルートⅠは国道135号線であり、ルートⅡは民営有料道路「熱海ビーチライン」である。まず走行時間関数の決定についてであるが、交通量が0のときは制限速度で走行したとして、国道135号線10.24分、熱海ビーチライン6.20分を得た。係数 a_n について

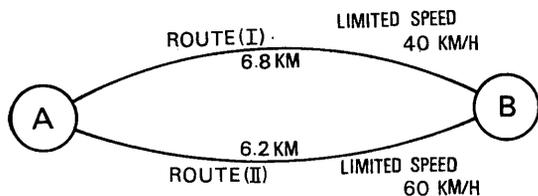


Fig. 5. Road Network, Distance, Limited Speed
Route (I) is 135th National Way,
Route (II) is Atami Beach Line

Table III. OD Volume on Fig.5, Vehicles per 30minutes

| | PASSENGER CARS | TRUCKS | BUSES | PASSENGER CAR EQUIVALENTS |
|-----------|----------------|--------|-------|---------------------------|
| ROUTE(I) | 109 | 55 | 2 | 223 |
| ROUTE(II) | 76 | 9 | 0 | 94 |

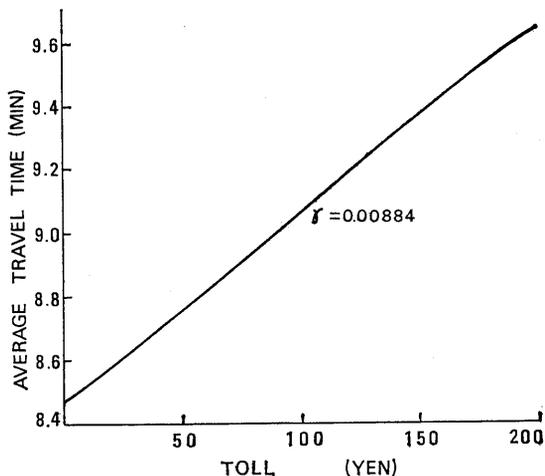


Fig. 6. Total Revenue-Toll relationship for maximizing Total Revenue on Fig.5

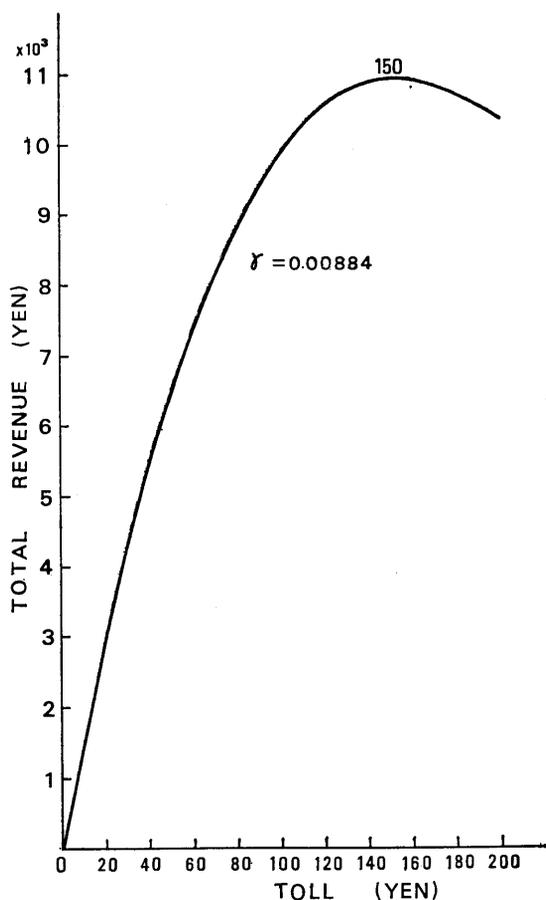


Fig. 7. Average Travel Time-Toll relationship for minimizing Total Travel Time on Fig.5

は各々の道路現況から計算して $a_1=0.00044$, $a_2=0.00506$ となって次式を得た。

$$\text{国道 135 号線} : T_1=0.00044Q_1+10.24$$

$$\text{熱海ビーチライン} : T_2=0.00506Q_2+6.20$$

定数 γ については実績の OD 交通量に合うように逆算して求めたところ $\gamma=0.00884$ を得た。このときの OD 交通量は表-3 に示すが、小型乗用者に換算して計算している。以上を基にして計算の結果、料金収入最大化の場合を図-6、総走行時間最小化の場合を図-7 にそれぞれ示す。これによれば料金収入最大化の場合の最適料金は 150 円 (小型乗用車)、総走行時間最小化の場合には Q 円となった。この結果は「熱海ビーチライン」が小型乗用車通行料金として 130 円であり、その上民営 (当然採算を考えるとと思われる) であることも考慮すれば、かなりの好結果を得たといえよう。

5. あとがき

今回の研究では交通量配分理論を応用して有料道路を含む道路網を対象とした場合の有料道路通行料金最適化へのアプローチを試みたのであるが、本報告では仮想の道路網上での計算例が多く、実際の道路網への適用は一例にとどまっている。本モデルが実用的なモデルといえるかどうかを判断するには今後より多くの実際の道路網上での検討が必要である。

またモデル式自体の適用性についてみれば、実際の有料道路は多目的 (観光, 産業など) なものが多く、そこを利用する車は多種にわたっている。有料道路を利用して受けるサービスは車種によって当然異ってくるので、道路の効率ある利用を図るためには車種を考慮した料金を決める必要があり、現実にそう決められているが、本モデルは車種別料金決定にも適用は可能である。この場合本モデルを車種別に適用して重ね合わせることになるが、車種間相互に干渉があるために単純に重ね合わせるわけにはいかず、混入率などの条件が必要になってくる。本モデルにおいてリンクを一般街路、有料道路を都

市高速道路と考えれば、現在および将来の都市高速道路網への適用も容易であるし、リンクを主要幹線道路、有料道路を都市間高速国道と考えれば広範囲な有料道路網への適用も可能であろう。また観光有料道路など特別な目的を持つ有料道路への適用の可能性—この場合には計量化が困難な factor (例えば魅力など) を多く含んでくると思われるのでかなり難しい問題となるであろうが—の検討をする必要があるだろう。時間便益 a_m については対象とする道路網によって差異があるだろうし、定数としてではなく分布形として与えられたとしても本モデルは適用できるが、計算時間が長くなるのでその価値判断が必要である。また走行時間関数について本報告では線形に仮定しているが、交通量が多い場合には交通容量の概念を導入する必要があり、容量制限を考慮した走行時間関数のモデルを開発すべきである。しかし、この場合にも計算時間は長くなるという問題は残るであろう。

以上このように残された課題は幾多あるが、今後上記の方向を踏まえて研究を続けたいと思っている。

なお、計算には名古屋大学大型計算機センターの FACOM230-60 を使用した。

参 考 文 献

- 1) G. J. Roth: "Self-financing Road System", London, 1966
- 2) M. J. Beckmann: "On Optimal Tolls for Highways, Tunnels, and Bridges", Vehicular Traffic Science, Proceeding of the Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow, 1967
- 3) 松井寛: "確率最大化による交通量配分理論" 交通工学, Vol. 6, No. 5, 昭和46年9月
- 4) 松井寛, 伊豆原浩二: "有料道路の料金最適化に関する一考察" 土木学会中部支部研究発表概要集 p. 183, 昭和48年2月