

交通需要の時間分散を目指した都市高速道路の料金決定モデルに関する研究^{*1}

A Study of Optimal Toll Model of Urban Expressway for Temporal Dispersion of Inflow Demand^{*1}

伊庭洋一^{*2}・宇野伸宏^{*3}・塩見康博^{*4}・安隆浩^{*5}

By Yoichi IBA^{*2}・Nobuhiro UNO^{*3}・Yasuhiro SHIOMI^{*4}・Yoongho AHN^{*5}

1. はじめに

都市内高速道路における通行料金は一般道との関係で、受益者負担原則、償還主義、公正妥当主義、混雑料金原則が成立するよう、決定されるのが望ましい。加えて、上記の混雑料金原則とも関連するが、都市高速道路の料金は交通管制の一方策としての可能性も秘めているといえる。しかし、現状では朝・夕のピーク時間帯に交通需要の集中により慢性的な交通渋滞が発生しているなど、上述の料金体系理念を体現する交通状態が実現されているとは言い難い。この解決策の一つとして、時間帯別に適切な通行料金を設定し、交通需要の時間的分散を図る施策が挙げられる。特に近年、ETCの普及により、柔軟な料金体系の設定が実現可能となり、時間帯別の料金割引施策が実際に導入されている。しかしながら、利用者の料金弾力性などは考慮されていない。また、時間帯別料金設定による需要分散効果を図った適切な通行料金のあり方に関する知見はこれまでに得られていない。

そこで本研究では時間帯別料金設定による交通需要分散効果を考慮した、都市高速道路通行料金決定モデルを構築する。まず一般道と高速道路で構成される道路ネットワークにおいて、料金を所与とする時間帯別需要変動型利用者均衡配分モデルを構築する。このモデルは、利用者の出発時間帯ならびに経路の選択を表現可能な利用者均衡配分モデルである。さらに、利用者均衡状態を仮定した上で、総走行時間・料金収入・消費者余剰に関する最適化問題として時間帯別料金決定モデルを定式化する。仮想ネットワークにおける最適通行料金を提案した料金決定問題により算出し、その計算結果について考察を行う。とりわけ、総走行時間最小化、料金収入最大化、消費者余剰最大化の各目的関数を料金決定問題に組み込んでおり、この目的関数の相違と最適料金の関係についても考察を行う。

*1 キーワーズ：交通需要、需要分散、都市高速道路、料金決定問題

*2：正会員，工修，阪神高速道路株式会社 大阪管理部 保全工事課（〒552-0023 大阪市港区港晴2-11-12，TEL.06-6576-6111，FAX.06-6576-6171）

*3：正会員，工博，京都大学大学院経営管理研究部

*4：正会員，工博，京都大学大学院工学研究科

*5：正会員，工博，京都大学大学院工学研究科

2. 時間帯別需要変動型利用者均衡モデル

(1) 配分に際する仮定

時間帯別料金設定による交通量配分の変化を表現するため、以下の仮定を設ける。

- 利用者は利用時間帯と経路の選択を行う。
- 全時間帯のOD需要の和は一定とする。

$$\sum_{n \in N} q_{rs}^n = \bar{q}_{rs} = \text{const.} \quad (1)$$

q_{rs}^n ：時間帯 n ，OD ペア rs の交通量

- 時間帯・経路間ではコスト（一般化費用）に応じて利用者均衡が成り立つ。経路コストは(2)式で表わされる。

$$c_k^{rs,n} = t_k^{rs,n} + p_k^{rs,n} / \delta \quad (2)$$

$c_k^{rs,n}$ ：時間帯 n ，OD ペア rs の経路 k のコスト

$t_k^{rs,n}$ ：時間帯 n ，OD ペア rs の経路 k の所要時間

$p_k^{rs,n}$ ：時間帯 n ，OD ペア rs の経路 k の料金

δ ：時間価値

- 各時間帯の残留交通量は考えない。

(2) 時間帯別需要変動型利用者均衡の定式化

上述の仮定に基づき、時間帯及び経路の選択は、(3) および(4)式で示されるNested Logitモデルで表される。

$$\Pr(k | n)_{rs} = \frac{\exp(-\theta_1 c_k^{rs,n})}{\sum_{k \in K_{rs}^n} \exp(-\theta_1 c_k^{rs,n})} \quad (3)$$

$\Pr(kn)_{rs}$ ：OD ペア rs 間で時間帯 n を選んだ条件の下に、経路 k を選択する確率

θ_1 ：経路転換パラメータ

K_{rs}^n ：時間帯 n ，OD ペア rs の経路集合

$$\Pr(n)_{rs} = \frac{\exp\{-\theta_2 (C_{rs}^n + S_{rs}^n)\}}{\sum_{n \in N} \exp\{-\theta_2 (C_{rs}^n + S_{rs}^n)\}} \quad (4)$$

$\Pr(n)_{rs}$ ：OD ペア rs 間で時間帯 n を選択する確率

θ_2 ：時間帯転換パラメータ

C_{rs}^n ：OD ペア rs における時間帯 n の固定費用

S_{rs}^n ：OD ペア rs における時間帯 n の経路選択の期

待最小費用

パラメータは、既往研究¹⁾²⁾を参考に $\theta_1=0.1$, $\theta_2=0.01$ とした上で、観測OD交通量を用いて現況の交通量配分状況を的確に記述する C_{rs}^n を最尤推定法により導出する。

本配分の均衡状態と等価な最適化問題は(5)~(9)式で記述される。これは、目的関数が凸関数、制約条件が凸領域であることから、最適解が満足する必要十分条件はKuhn-Tucker条件として与えられ、(3), (4)式と一致する。

$$\begin{aligned} \min. Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) &= \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_a} \int_0^{x_a^n} c_a^n(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}^n} f_k^{rs,n} \ln \frac{f_k^{rs,n}}{q_{rs}^n} \\ &+ \frac{1}{\theta_2} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^n \ln \frac{q_{rs}^n}{\bar{q}_{rs}} + \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^n C_{rs}^n \quad (5) \\ \text{subject to} & \\ \sum_{k \in K_{rs}^n} f_k^{rs,n} &= q_{rs}^n, \quad \forall n \in N, r \in R, s \in S \quad (6) \\ \sum_{n \in N} q_{rs}^n &= \bar{q}_{rs}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (7) \\ f_k^{rs,n} &\geq 0, \quad \forall k \in K_{rs}^n, n \in N, r \in R, s \in S \quad (8) \\ q_{rs}^n &\geq 0, \quad \forall n \in N, r \in R, s \in S \quad (9) \end{aligned}$$

\mathbf{x} : リンク交通量ベクトル

\mathbf{f} : 経路交通量ベクトル

\mathbf{q} : OD交通量ベクトル

$c_a^n(x_a^n)$: 時間帯 n , リンク a のリンクコスト関数

$f_k^{rs,n}$: 時間帯 n , ODペア rs の経路 k の交通量

3. 最適通行料金決定モデルの構築

通行料金決定モデルを構築するにあたり、与えられた料金の下で時間帯・経路に関する利用者均衡状態の成立を仮定する。その上で、高速道路建設費の償還条件、及び各リンクの容量条件を満たしつつ、ある目的関数を最大化、もしくは最小化する料金体系を決定する。このとき、本モデルは(10)~(13)式のように2レベル問題として定式化され、求める変数は時間帯別料金となる。ただし、 Z は時間帯均衡配分での目的関数を表す。

$$\begin{aligned} \text{Max or Min} & \quad (\text{目的関数}) \quad (10) \\ \text{subject to} & \quad (\text{料金収入} \geq (\text{償還に必要な金額})) \quad (11) \\ & \quad (\text{配分交通量} \leq (\text{容量条件})) \quad (12) \\ \min. & \quad Z \quad (13) \end{aligned}$$

目的関数としては、成瀬³⁾を参照すると総走行時間最小化、料金収入最大化、及び消費者余剰⁴⁾最大化が考えられ、それぞれ式(15)~(17)で定義される。

$$\text{総旅行時間} : \min. \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_a} x_a^n t_a^n \quad (14)$$

N : 全時間帯の集合

A_a : 全リンクの集合

x_a^n : 時間帯 n , リンク a の交通量

t_a^n : 時間帯 n , リンク a の所要時間

$$\text{料金収入} : \max. \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_a} F^n x_a^n + \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_a} P^n l_a x_a^n \quad (15)$$

A_F : 初乗り料金のかかるリンク集合

F^n : 時間帯 n の初乗り料金

A_P : 距離料金のかかるリンク集合

P^n : 時間帯 n の距離料金

l_a : リンク a の距離

$$\text{消費者余剰} : \max. \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \bar{q}_{rs} (S_2^{rs,B} - S_2^{rs,A}) \quad (16)$$

R : 全起点集合

S : 全終点集合

\bar{q}_{rs} : ODペア rs の全時間帯交通量

S_2^{rs} : ODペア rs における時間帯選択の期待最小費用

A : 料金変更後を表す添え字

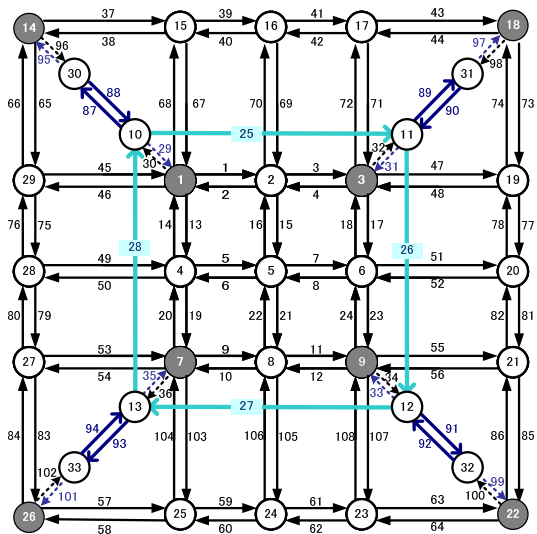
B : 料金変更前を表す添え字

本モデルの解法は以下の通りである：①解の候補として複数の料金パターンを与える。②各料金パターンにおいて(13)式の時間帯と経路選択を考慮した均衡配分を行う。③配分結果に基づき、(11)式の償還条件、(12)式の高速度路のネットワーク容量条件を満たす料金パターンのみを抽出する。④各料金パターンに対して目的関数値を算出し、最適な順に並べる。

4. 仮想ネットワークによる最適料金体系の分析

(1) 計算条件の設定

仮想ネットワークとして一般道リンクと高速道路リンク、及び高速道路料金を課すダミーリンクで構成された図1のネットワークを想定する。このとき、各リンク a の所要時間 $t_a(x_a)$ は(18)式のBPR関数に従うとする。仮想ネットワーク上の各リンクのパラメータ値を表1に整理する。



● : 需要発生ノード ○ : 分岐ノード

図1 仮想ネットワーク

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha (x_a / C_a)^\beta \right\} \quad (17)$$

t_{a0} : 0 フロー時におけるリンク a の所要時間

α, β : BPR 関数の係数

表1 リンクパラメータ値

記号	用途	t_{a0} (分)	距離 (km)	容量 (台/h)	α	β
	環状高速	8	10	8000	0.4	2.8
	放射高速	6	8	4000	0.4	2.8
	一般道	10	5	2000	0.54	2.4
	出口	0	0			
	入口	0	0			

償還条件は、建設費 180 億円/km, 償還年数 45 年, 社会的割引率 4%を想定し, 計算対象のピーク 3 時間にて賄うべき必要な償還額は 1 日の償還必要額の 17%とする。また, 時間価値は 50 円/分とする。分析対象時間帯として 3 つの時間帯 (時間帯 1, 時間帯 2, 時間帯 3) を想定し, 各時間帯幅は 1 時間とする。時間帯別料金設定導入前の基準状態として, 高速道路料金を一律 700 円とし, その時の各時間帯の交通需要は時間帯 1 が最小で→3, →2 の順に大きくなるように設定する。

その上で, 初乗り料金を 0~1000 円で 100 円刻み, 距離料金を 0,25,50 (円/km) として需要の高い時間帯ほど, 初乗り・距離料金共に高額になるよう料金パターンを設定し, 総走行時間を最小化する料金パターンについて考察を行う。

OD 交通量パターンは, 全 OD ペアで交通需要量を等しくなるよう設定する。

(2) 各目的関数の最適料金

表2より総走行時間最小化料金は, 低額な初乗りのみの時間帯別料金で長距離旅行者に好ましく, ピーク時の需要分散が目指されている。値下げにより料金収入は下がり消費者余剰は上がる。償還条件を考慮すると, 通行料金が高くなるため, 各目的関数の増減は小さい。

料金収入最大化料金は, 基準料金に距離料金25円/km が加わっている。この料金より値上げすると, 高速道路交通量が大きく減少し, 減収すると考えられる。距

離料金が加わることもあるため, 消費者余剰は減少し, 高速道路交通量が減少し, その分一般道に負荷がかかるため総走行時間は増加する。

消費者余剰最大化料金は, 償還条件を考慮しない場合の時間帯1は無料となっており, それ以外についても, 初乗り100円, 距離料金25円/kmという初乗りを低く抑えた距離制料金となっている。この料金で全時間帯において, 容量条件を満たす範囲内で, 一般化費用の減少分の全利用者総和が最小となっている。距離料金が加わっているため総走行時間は増加し, 値下げとなるので料金収入は減少する。

(3) 時間帯別のOD交通量の増減

本節では, 基準料金時に対する各目的関数の最適料金時の時間帯別OD交通量の増減を分析する。なお, 償還より料金変更による交通制御の効果を評価したいので, 最適料金は償還条件を考慮しない料金とする。

表3 総走行時間最小化時のOD交通量増減 (%)

時間帯 1

O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		0.7	2.3	3.1	1.6	3.5	3.2	0.8
3	2.3		3.1	0.7	0.8	1.6	3.5	3.2
7	0.7	3.1		2.3	3.5	3.2	0.8	1.6
9	3.1	2.3	0.7		3.2	0.8	1.6	3.5
14	1.3	4.4	0.5	4.2		5.0	4.4	5.2
18	0.5	1.3	4.2	4.4	5.2		5.0	4.4
22	4.2	0.5	4.4	1.3	4.4	5.2		5.0
26	4.4	4.2	1.3	0.5	5.0	4.4	5.2	

時間帯 2

O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		-1.2	-2.0	-0.5	1.5	-1.0	-0.4	3.4
3	-2.0		-0.5	-1.2	3.4	1.5	-1.0	-0.4
7	-1.2	-0.5		-2.0	-1.0	-0.4	3.4	1.5
9	-0.5	-2.0	-1.2		-0.4	3.4	1.5	-1.0
14	1.7	-2.5	3.3	-1.9		-2.7	-1.8	-1.0
18	3.3	1.7	-1.9	-2.5	-1.0		-2.7	-1.8
22	-1.9	3.3	-2.5	1.7	-1.8	-1.0		-2.7
26	-2.5	-1.9	1.7	3.4	-2.7	-1.8	-1.0	

時間帯 3

O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		0.9	0.7	-1.7	-2.9	-1.4	-1.9	-4.5
3	0.7		-1.7	0.9	-4.5	-2.9	-1.4	-1.9
7	0.9	-1.7		0.7	-1.4	-1.9	-4.5	-2.9
9	-1.7	0.7	0.9		-1.9	-4.5	-2.9	-1.4
14	-2.9	-0.3	-4.3	-0.8		-0.6	-1.1	-2.7
18	-4.3	-2.9	-0.8	-0.3	-2.7		-0.6	-1.1
22	-0.8	-4.3	-0.3	-2.9	-1.1	-2.7		-0.6
26	-0.3	-0.8	-2.9	-4.3	-0.6	-1.1	-2.7	

表2 各目的関数の最適料金

	初乗り料金(円)			距離料金(円/km)			総走行時間		料金収入		消費者余剰
	時間帯1	時間帯2	時間帯3	時間帯1	時間帯2	時間帯3	値(万分)	増減(%)	値(万円)	増減(%)	値(万分)
tt(なし)	0	400	200	0	0	0	227.3	-9.59	1548.5	-61.50	22.8
tt(あり)	200	800	400	0	0	0	238.9	-4.97	2928.6	-27.18	10.5
income	700	700	700	25	25	25	304.6	21.16	4329.2	7.65	-30.1
cs(なし)	0	100	100	0	25	25	260.6	3.67	2216.3	-44.89	36.3
cs(あり)	100	100	100	25	25	25	277.3	10.33	2961.8	-26.35	31.8
基準料金	700	700	700	0	0	0	251.4	0.00	4021.6	0.00	0

*tt : 総走行時間最小化料金, income : 料金収入最大化料金, cs : 消費者余剰最大化料金
 * (なし) : 償還条件を考慮せず, (あり) : 償還条件を考慮

表3より、総走行時間最小化時は、時間帯別料金となるため、時間帯2,3の交通量が時間帯1に分散している。特に、走行時間の長い外側ノードから外側ノードへのOD (OD表の右下) で、顕著である。表4より、料金収入最大化時は、時間帯別料金でないため、基準料金時に対する変動はさほど大きくない。表5より、消費者余剰最大化時は、時間帯1で無料のため、概ね時間帯1で増加し、時間帯2,3で減少している。とはいえ、総走行時間最小化時(表3)ほど時間帯の変動が大きくはない。

(4) 結果の整理

本研究の例題計算の結果として、総走行時間最小化には、初乗りのみの時間帯別料金が有効である。そのとき、料金収入は下がり、消費者余剰は上がる。償還条件を考慮すると、基準料金時に対する各目的関数の増減は小さくなる。また、OD交通量は時間的に分散する。

料金収入最大化料金は、基準料金に距離料金25円/kmが加わった料金で、この額より値上げすると、高速道路利用交通量の減少もあり減収となる。このとき、基準料金時と比較して消費者余剰は減少し、総走行時間は増加する。また、OD交通量の時間的変動は小さい。

消費者余剰最大化料金は、全時間帯において、初乗り料金を低額に抑えた距離制料金となっている。容量条件を満たす範囲内で、全ODの利用者をトータルして、最も安く感じる料金になっているといえる。そのとき、総走行時間は増加し、料金収入は減少する。また、時間帯別料金によりOD交通量は時間的に分散するが、総走行時間最小化時ほどは分散しない。

表4 料金収入最大化時のOD交通量増減(%)

時間帯 1								
O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		0.5	0.8	0.6	0.2	0.0	-0.4	0.9
3	0.8		0.6	0.5	0.9	0.2	0.0	-0.4
7	0.5	0.6		0.8	0.0	-0.4	0.9	0.2
9	0.6	0.8	0.5		-0.4	0.9	0.2	0.0
14	0.3	0.3	0.9	0.1		-0.2	-1.8	0.8
18	0.9	0.3	0.1	0.3	0.8		-0.3	-1.7
22	0.1	0.9	0.3	0.3	-1.7	0.8		-0.3
26	0.3	0.1	0.3	0.9	-0.2	-1.8	0.8	

時間帯 2								
O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		-0.3	-0.5	-0.3	-0.2	0.1	0.4	-0.6
3	-0.5		-0.3	-0.3	-0.6	-0.2	0.0	0.4
7	-0.3	-0.3		-0.5	0.1	0.4	-0.6	-0.2
9	-0.3	-0.5	-0.3		0.4	-0.6	-0.2	0.0
14	-0.2	-0.1	-0.6	0.1		0.2	1.2	-0.5
18	-0.6	-0.2	0.1	-0.1	-0.5		0.2	1.2
22	0.1	-0.6	-0.1	-0.2	1.2	-0.5		0.2
26	-0.1	0.1	-0.2	-0.6	0.2	1.2	-0.5	

時間帯 3								
O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.2	0.0
3	0.0		-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2
7	-0.1	-0.1		0.0	-0.1	-0.2	0.0	0.0
9	-0.1	0.0	-0.1		-0.2	0.0	0.0	-0.1
14	0.0	-0.1	0.0	-0.2		0.0	-0.1	0.0
18	0.0	0.0	-0.2	-0.1	0.0		0.0	-0.1
22	-0.2	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0		0.0
26	-0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	

表5 消費者余剰最大化時のOD交通量増減(%)

時間帯 1								
O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		1.6	4.9	0.6	-0.7	4.6	3.9	0.2
3	4.9		0.6	1.6	0.2	-0.7	4.6	3.9
7	1.6	0.6		4.9	4.6	3.9	0.2	-0.7
9	0.6	4.9	1.6		3.9	0.2	-0.7	4.6
14	-0.7	-0.3	0.4	-1.3		-0.9	1.9	6.2
18	0.4	-0.7	-1.3	-0.3	6.2		-0.9	1.9
22	-1.3	0.4	-0.3	-0.7	1.9	6.2		-0.9
26	-0.3	-1.3	-0.7	0.4	-0.9	1.9	6.2	

時間帯 2								
O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		-0.6	-1.9	-0.1	0.2	-1.5	-1.2	-0.2
3	-1.9		-0.1	-0.6	-0.2	0.2	-1.5	-1.2
7	-0.6	-0.1		-1.9	-1.5	-1.2	-0.2	0.2
9	-0.1	-1.9	-0.6		-1.2	-0.2	0.2	-1.5
14	0.3	0.2	-0.2	0.6		0.3	-0.5	-2.2
18	-0.2	0.3	0.6	0.2	-2.2		0.3	-0.5
22	0.6	-0.2	0.2	0.3	-0.5	-2.2		0.3
26	0.2	0.6	0.3	-0.2	0.3	-0.5	-2.1	

時間帯 3								
O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		-0.6	-1.4	-0.3	0.2	-1.6	-1.4	0.0
3	-1.4		-0.3	-0.6	0.1	0.2	-1.6	-1.4
7	-0.6	-0.3		-1.4	-1.6	-1.4	0.1	0.2
9	-0.3	-1.4	-0.6		-1.4	0.1	0.2	-1.6
14	0.2	0.0	0.0	0.3		0.3	-0.8	-2.1
18	0.0	0.2	0.3	0.0	-2.1		0.3	-0.8
22	0.3	0.0	0.0	0.2	-0.8	-2.1		0.3
26	0.0	0.3	0.2	0.0	0.3	-0.8	-2.1	

5. 結論

本研究では、時間帯の需要変動を考慮した配分を考案し、通行料金の決定モデルを構築した。そして、本モデルを用い、総走行時間・料金収入・消費者余剰における最適料金やその配分状況を求めた。その結果、総走行時間最小化料金は時間帯別料金となったが、他の目的関数では必ずしもその傾向はなかった。償還条件を考慮すると、いずれの目的関数における最適料金時も基準料金時に対する各目的関数の増減は小さくなった。また、総走行時間最小化料金時は、時間帯別料金のため、OD交通量の時間的分散が見られたが、他の目的関数においては顕著でなかった。今後は、実ネットワークでの適用、 θ 1, θ 2のアンケート調査等による推定が必要である。

参考文献

- 1) Mitsuhsa TANAKA, Nobuhiro UNO, Fumitaka KURAUCHI, Yoongho Ahn : An Analysis of Effects of Trend Information upon Route Choice Behavior by In-Laboratory Experiment, International Journal of ITS Research, Vol.6, No.1, pp57-65, July 2008
- 2) 中山晶一郎 : 交通ネットワークの連結効果と信頼性 : 統一的な信頼性指標としての最小旅行時間のパーセントイル値, 土木計画学・講演集 Vol.28, CD-ROM, 2008.11
- 3) 成瀬栄治 : 利用者均衡を考慮した都市高速道路の料金決定モデルに関する研究, 京都大学大学院修士論文, 1988.2
- 4) 北村隆一・森川高行 : 交通行動の分析とモデリング, 技報堂出版, p.144-145, 2002.5