

# 誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定\*

## Estimation of User Benefits of Road Investment Considering Induced Traffic in Congested Area\*

円山 琢也\*\*・原田 昇\*\*\*・太田 勝敏\*\*\*\*

By Takuya MARUYAMA\*\*, Noboru HARATA\*\*\*, and Katsutoshi OHTA\*\*\*\*

### 1. はじめに

混雑緩和を目的として道路などの交通施設整備を行うと、新たな交通需要を誘発し、結局混雑緩和にはつながらないという「誘発交通問題」が議論されてきた。道路整備により自動車利用のアクセシビリティが増加すると、利用者は、鉄道から自動車利用へ手段の変更、目的地の変更、トリップ頻度の増加といった行動変化をとる可能性がある。本研究では、まず、これらの誘発交通を扱うことが可能な4段階統合Nested Logit型確率的ネットワーク均衡モデルを構築し、そのモデルを需要予測に用いる場合の経済理論とも整合的の取れた便益計測法を示す。そして、この統合モデルと既存の固定需要型配分モデルのそれぞれを用いて東京都市圏において現実に計画されている外郭環状道路の整備効果を推定する。誘発交通を無視した固定需要型のモデルを用いた場合、利用者便益は、一般に歪みが生じることが知られている<sup>1),2),3)</sup>。本研究は、これらを実証的に検討することを目的としており、研究の社会的意義は大きい。

### 2. モデルの定式化

代表的個人の行動に図-1のようなNested Logit型の選択行動を仮定する。この際に、よく知られているように適切な定式化を行うことで需要予測と便益評価および経済理論との整合性を取ることができる。また、本稿ではトリップ目的別のモデルを意図して代表的個人をクラス分けしてモデル化する。利用者クラス*i*の代表的個人の直接効用関数*U<sub>i</sub>*を次のように定める。

$$U_i = - \sum_{r,s,m,k} \tau^i f_{m,k}^{i,rs} t_{m,k}^{rs*} + u_i + z_i \quad (1)$$

$$u_i = - \sum_{r,s,m,k} \frac{1}{\theta_1^{i,rs}} f_{m,k}^{i,rs} \ln(f_{m,k}^{i,rs} / q_m^{i,rs}) - \sum_{r,s,m} \frac{1}{\theta_2^{i,rs}} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / O_r^{im}) - \sum_{r,m} \frac{1}{\theta_3^i} O_r^{im} \ln(O_r^{im} / O_r^i) - \sum_r \frac{1}{\theta_4^i} [O_r^i \ln(O_r^i / N_r^i) + O_{r0}^i \ln(O_{r0}^i / N_r^i)] - \sum_{r,s,m} q_m^{i,rs} C_s^{im} - \sum_{r,m} O_r^{im} C_m^{ir} - \sum_r O_r^i C_r^i \quad (2)$$

予算制約式は、

$$\sum_{r,s,m,k} p_{m,k}^{rs} f_{m,k}^{i,rs} + z_i = y_i, \quad (3)$$

であり、交通量の保存式は以下ようになる。

$$O_r + O_{r0} = N_r^i, \quad \sum_m O_r^{im} = O_r^i, \quad \sum_s q_m^{i,rs} = O_r^{im},$$

$$\sum_k f_{m,k}^{i,rs} = q_m^{i,rs}, \quad x_a^m = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{m,rs} f_{m,k}^{i,rs}, \quad x_a^m = \sum_i x_a^{im},$$

$$x_a^m \geq 0, x_a^{im} \geq 0, f_{m,k}^{i,rs} \geq 0, q_m^{i,rs} \geq 0, O_r^{im} \geq 0, O_r^i \geq 0, O_{r0}^i \geq 0 \quad (4)$$

ここで、ODペア*rs*の手段*m*の経路*k*の均衡時における所要時間を*t<sub>m,k</sub><sup>rs\*</sup>*、価格(料金)を*p<sub>m,k</sub><sup>rs</sup>*とする。*z<sub>i</sub>*は、代表的個人の交通以外の財の消費を表現する合成財(価格を1に基準化)、*y<sub>i</sub>*は代表的個人の所得、*τ<sup>i</sup>*は、利用者クラス*i*の時間価値である。また、手段*m*リンク*a*におけるクラス別リンク交通量*x<sub>a</sub><sup>im</sup>*、クラス合計のリンク交通量*x<sub>a</sub><sup>m</sup>*、リンクコスト関数*t<sub>a</sub><sup>m</sup>(·)*、料金*p<sub>a</sub><sup>m</sup>*、リンク経路接続行列*δ<sub>a,k</sub><sup>m,rs</sup>*、手段別経路交通量*f<sub>m,k</sub><sup>i,rs</sup>*、手段別OD交通量*q<sub>m</sub><sup>i,rs</sup>*、手段別発生交通量*O<sub>r</sub><sup>im</sup>*、発生交通量*O<sub>r</sub><sup>i</sup>*、利用者クラス*i*のトリップ発生要因の人口指標*N<sub>r</sub><sup>i</sup>*、対象時間帯にトリップを行わない利

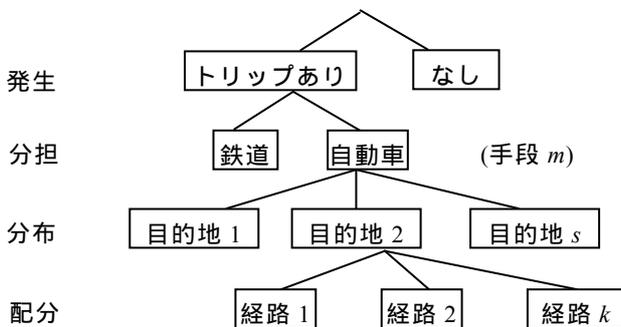


図-1 Nested Logit型の選択構造

キーワード: 整備効果計測法, 交通計画評価

\* 学生会員, 修, 東京大学大学院新領域創成科学研究科

\*\* 正会員, 工博, 東京大学大学院新領域創成科学研究科

\*\*\*フェロー, Ph. D, 東京大学大学院工学系研究科

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, Tel 03-5841-6234,

Fax03-5841-8527)

用者数  $O_{r_0}^i$  とする．  $\theta_1^m, \theta_2^{im}, \theta_3^i, \theta_4^i$  は，パラメータ，  $C_s^{im}, C_m^{ir}, C_r^i$  は，各選択段階に対応する固有の非効用項である．

代表的個人の交通行動は，次の効用最大化問題として定式化される．

$$V_i = \max. U_i \quad (5)$$

$$\text{s.t. (3),(4)}$$

ここで  $V_i$  は利用者クラス  $i$  の間接効用関数である．この最適化問題を解くと，図-1 の構造の以下の Nested Logit モデルが導出される．

$$f_{m,k}^{i,rs} = \frac{\exp[-\theta_1^{im} (\tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs})]}{\sum_k \exp[-\theta_1^{im} (\tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs})]} q_m^{i,rs} \quad (6a)$$

$$q_m^{i,rs} = \frac{\exp[-\theta_2^{im} (C_s^{im} + S_{rs}^{im})]}{\sum_s \exp[-\theta_2^{im} (C_s^{im} + S_{rs}^{im})]} O_r^{im}, \quad (6b)$$

$$O_r^{im} = \frac{\exp[-\theta_3^i (C_m^{ir} + S_m^{ir})]}{\sum_m \exp[-\theta_3^i (C_m^{ir} + S_m^{ir})]} O_r^i, \quad (6c)$$

$$O_r^i = \frac{\exp[-\theta_4^i (C_r^i + S_r^i)]}{1 + \exp[-\theta_4^i (C_r^i + S_r^i)]} N_r^i \quad (6d)$$

ここで，各段階の期待最小費用は以下ようになる．

$$S_{rs}^{im} = -\frac{1}{\theta_1^{im}} \ln \sum_k \exp[-\theta_1^{im} (\tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs})] \quad (7a)$$

$$S_m^{ir} = -\frac{1}{\theta_2^{im}} \ln \sum_s \exp[-\theta_2^{im} (C_s^{im} + S_{rs}^{im})] \quad (7b)$$

$$S_r^i = -\frac{1}{\theta_3^i} \ln \sum_m \exp[-\theta_3^i (C_m^{ir} + S_m^{ir})] \quad (7c)$$

これら(6),(7)式を(1)式の直接効用関数に代入すると，以下の準線形型の間接効用関数  $V_i$  が得られる．

$$V_i = y_i + \sum_r \frac{1}{\theta_4^i} [N_r^i \ln \{1 + \exp[-\theta_4^i (C_r^i + S_r^i)]\}] \quad (8)$$

ここで，発ゾーン，クラスごとの期待最大効用

$$\tilde{S}_r^i = \frac{1}{\theta_4^i} \ln \{1 + \exp[-\theta_4^i (C_r^i + S_r^i)]\} \quad (9)$$

と置けば次式が得られる．

$$V_i = y_i + \sum_r N_r^i \tilde{S}_r^i \quad (10)$$

交通投資の前後で，この効用値を比較することで，投資の利用者便益  $UB$  (消費者余剰  $MD$ ，今回は  $EV, CV$  と同値) を次のよう求めることができる．

$$UB = \sum_{i,r} N_r^i (\tilde{S}_r^{i,with} - \tilde{S}_r^{i,without}) \quad (11)$$

$with$  を投資後， $without$  を投資前を示す添字とする．なお，Oppenheim のテキスト<sup>4)</sup>においては，上式と若干異なる便益指標が示されているが，利用者が現実遭遇するコストを用いている点で，上式の利用が望ましいと思われる．以上が，理論的に導かれた便

益指標であるが，手段別の台形公式を用いても，これはほぼ近似できることが知られている．

$$UB = \frac{1}{2} \sum_{i,rs,m} (q_m^{i,rs,with} + q_m^{i,rs,without}) (S_{rs}^{i,m,without} - S_{rs}^{i,m,with}) \quad (12)$$

この近似の精度は，以下で，実証的に検討する．台形公式を利用する利点は，手段別の発生便益を計算できる点にある．

また，複数の利用者クラスが混在する今回のモデルは，マルチクラス型ネットワーク均衡モデルとなる．ネットワーク上の混雑状況が，対象時間帯内で手段別に独立に静的均衡による定常状態として記述できると仮定すると，その均衡解の算出は以下の最適化問題を解くことで効率的かつ厳密に行える．

$$\min. Z = \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \sum_{i,m,a} x_a^m p_a^m / \tau^i + \sum_i (-u_i / \tau^i) \quad (4)$$

$$\text{s.t.}$$

### 3. 東京都市圏への適用計算

ゾーン数は東京都市圏 PT 調査の中ゾーン 144，および東京都市圏以外周辺 5 県の合計 149 ゾーンとし，貨物車の OD 表は H06 年度道路交通センサス，それ以外の PT 目的別 OD 表は，H10 年度東京 PT 調査のデータを利用する．自動車および鉄道のネットワークは既存研究<sup>5)</sup>で構築されたものを利用した．また，既存研究では，鉄道の混雑を考慮していないため，今回，鉄道配分モデルの均衡モデルへの改良を行っている．PT は，通勤，通学，業務，私事，帰宅の 5 分類の目的区分を行い，これにセンサスの貨物車を加えた合計 6 分類の利用者クラスのモデルを作成する．また，業務私事目的のみ発生段階までの統合モデルを構築する．また，今回は配分段階に関しては，目的別の区別は行わず，時間価値も一律 50 円/分として外生的に与えた．

パラメータ推定は，現況が Nested Logit 型の確率的利用者均衡状態にあると仮定し，下位から順に段階推定により行った．推定結果の一部を表-1 に示す．全体として推定されたパラメータの符号条件，統計的有意性の問題は生じていない．また，推定されたパラメータは，各目的ごとに， $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$  の条件を満たしているため，図-1 の構造の Nested Logit モデルは，ランダム効用理論と整合的なモデルとなっていることが確認できる．

推定されたパラメータを元に、時間帯別に部分線形化法により均衡計算を行った。最終出力結果について、現状再現性の比較を表-2に示す。通常の時間帯別手段別 OD を所与とした固定需要型のモデルの値も示す。全体的に、統合モデルの再現精度は、固定需要モデルと優劣ない結果となっており、今回、構築した統合モデルは、政策評価を行うのに必要な精度を有していると判断される。

#### 4. 道路整備効果の推定例

この統合モデルを用いて、対象都市圏において現実に計画されている東京外郭環状道路(関越道～東名高速間、約16km)の建設効果を計測した結果を示す。表-3には、交通環境状況の変化の集計値を示す。統合モデルから得られる変化予測値は、通常の固定需要型のモデルから得られる数値よりも小さいものとなっている。

表-4には道路整備による利用者便益推定結果を

示す。固定モデル、統合モデルを用いた場合の値をそれぞれ時間帯別に示している。本稿のモデルでは、時間帯間の残留交通量を無視しており、トリップチェーンも考慮していないため、時間帯別の値そのものの信頼性は高くはなく、数値の慎重な解釈が必要であるが、さまざまな需要量のパターンでのモデルの感度を確認する意味も込めて提示している。

まず、本稿のモデルでは鉄道の混雑現象が表現されているため、統合モデルを用いた場合、道路整備による手段の変更による鉄道の混雑緩和の便益が追加される。台形公式(12)式を用いてこれらの手段別の便益を計算し合算した値も、ログサム変数の(11)式で便益を求めた場合もほぼ等しい値となっていることが確認できる。

全体的に、固定需要モデルによる便益は、統合モデルによる便益よりも高い値となる傾向にある。さらに、時間帯別に見ると、ピーク時のほうが、オフピークよりも、この過大評価の傾向は強い。これは、「誘発交通」をめぐる議論において、誘発交通は、

表-1 トリップ発生・手段・目的地選択モデル推定結果

	トリップ目的	通勤	業務	私事
発生	発生要因人口指標 $N_r^i$		従業人口	昼間人口
	期待最小費用 $-\theta_4$		-0.006	-0.003
	3次従業人口比率		1.122	
	無職人口比率			1.458
	時間帯別のダミー		(略)	(略)
	相関係数 $R$		0.978	0.827
手段	期待最小費用 $-\theta_3$	-0.017	-0.016	-0.018
	山手線ダミー		1.210	0.810
	23区ダミー			0.347
	定数項	-4.44	-11.26	-6.09
	尤度比 $\rho^2$	0.16	0.28	0.14
目的地 自動車	$\ln(\text{ゾーン面積})$	1.00	1.00	1.00
	期待最小費用 $-\theta_2^{car}$	-0.041	-0.033	-0.036
	$\ln(\text{就業者数密度})$	-0.06		
	$\ln(\text{従業者数密度})$	0.56		
	$\ln(2\text{次従業者数密度})$		0.15	
	$\ln(3\text{次従業者数密度})$		0.38	0.36
	相関係数 $R$	0.80	0.81	0.69
目的地 鉄道	$\ln(\text{ゾーン面積})$	1.00	1.00	1.00
	期待最小費用 $-\theta_2^{rail}$	-0.022	-0.018	-0.021
	$\ln(\text{就業者数密度})$	-0.31		
	$\ln(2\text{次従業者数密度})$	0.17		
	$\ln(3\text{次従業者数密度})$	1.03	1.10	0.86
	相関係数 $R$	0.87	0.97	0.78

注) 推定パラメータはすべて5%有意。経路選択のパラメータはキャリブレーションにより  $\theta_1^{car}=0.5$ ,  $\theta_1^{rail}=0.05$  と定めた。無職人口比率=非就業非従学人口/昼間人口, 昼間人口=非就業非就学人口+従業人口。山手線ダミー, 23区ダミーは、発ゾーンがそれぞれ山手線内, 23区内の場合1, それ以外0。

表-2 現状再現性指標

指標	モデル	相関係数	回帰係数	RMSE
自動車 リンク交通量	固定需要	0.72	0.73	11,740(台)
	統合	0.75	0.90	14,313(台)
鉄道 リンク交通量	固定需要	0.95	0.82	122,615(人)
	統合	0.94	1.16	139,263(人)
自動車 OD所要時間	固定需要	0.51	0.91	31.56(分)
	統合	0.65	0.84	20.50(分)
自動車OD表	統合	0.86	0.56	1,498(台)
鉄道OD表	統合	0.88	0.84	1,326(人)

注) 自動車リンク交通量は、都市圏内1,498箇所昼間12時間上下合計交通量(H09年度道路交通センサス), 鉄道リンク交通量は、1,050箇所駅間通過人員日単位上下合計値(H07年度大都市交通センサス), OD所要時間は時間帯別平均値(H06年度道路交通センサス・マスターから異常値を除いた値), 手段別OD表は、149ゾーン間日合計値との比較値

表-3 交通環境状況の変化予測

集計地域	23区内		全域	
	固定需要	統合	固定需要	統合
総走行台時	-6.08%	-3.11%	-1.52%	-0.23%
総走行台 <sup>+</sup>	-3.95%	-2.38%	-0.79%	+0.01%
平均走行速度	+2.27%	+0.76%	+0.74%	+0.23%
NO <sub>x</sub> 総排出量	-4.38%	-2.35%	-1.04%	-0.11%
CO <sub>2</sub> 総排出量	-4.98%	-2.86%	-1.25%	-0.12%

注) 外環道 with /without の変化率  
日合計値

表-4 道路整備による利用者便益推定値の比較結果 単位: 10<sup>3</sup> 円

時間帯	固定需要モデル 自動車混雑緩和便益 A	統合需要モデル				固定需要モデルと統合需要モデルの差 (A-D)/D	
		台形公式			ログサム式 D		台形式とログサム式の差 [(B+C)-D]/D
		自動車混雑緩和便益 B	鉄道混雑緩和便益 C	合計 B+C			
0	1,812	1,860	6	1,866	1,861	0.24%	-3%
1	1,238	1,293	0.5	1,293	1,290	0.24%	-4%
2	1,194	1,271	0	1,271	1,267	0.29%	-6%
3	1,449	1,518	0	1,518	1,512	0.46%	-4%
4	2,603	2,541	0.2	2,541	2,530	0.45%	3%
5	11,018	6,991	51	7,042	7,014	0.40%	57%
6	42,889	13,230	1,425	14,655	14,505	1.04%	196%
7	82,306	20,984	5,049	26,033	25,657	1.47%	221%
8	71,723	21,045	2,376	23,420	23,125	1.28%	210%
9	67,605	23,196	432	23,629	23,353	1.18%	189%
10	62,022	22,805	102	22,907	22,664	1.07%	174%
11	60,172	22,559	55	22,615	22,417	0.88%	168%
12	40,832	17,989	16	18,005	17,897	0.60%	128%
13	60,753	22,079	76	22,156	21,945	0.96%	177%
14	68,914	24,475	67	24,543	24,362	0.74%	183%
15	78,418	26,481	382	26,863	26,666	0.74%	194%
16	83,258	26,219	700	26,919	26,735	0.69%	211%
17	109,422	28,729	2,915	31,644	31,404	0.76%	248%
18	84,887	25,406	3,106	28,512	28,365	0.52%	199%
19	55,352	20,321	983	21,304	21,233	0.34%	161%
20	40,213	17,039	602	17,641	17,597	0.25%	129%
21	29,303	14,322	380	14,702	14,673	0.20%	100%
22	15,710	10,086	153	10,239	10,221	0.17%	54%
23	7,240	5,807	43	5,850	5,838	0.20%	24%
日合計	1,080,333	378,245	18,922	397,167	394,130	0.77%	174%

注) 本稿では、利用者便益として、自動車交通に関しては、旅行時間節約便益、鉄道交通においては、混雑負効用関数で表現された鉄道車内における混雑緩和便益のみを対象としている。

道路ネットワークが交通容量に近い状況で使われている場合に、大きな問題となることが指摘されていたことを、実際の都市圏において実証的定量的に確認した意義をもつ。一方、オフピークについては、誘発交通を無視した固定モデルのほうが、便益がわずかに過小評価される時間帯も見られている。

## 5. おわりに

Nested Logit 型確率的ネットワーク均衡モデルを用いて誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定を行った。提示した数値はあくまで一つの試算値に過ぎないが、従来の固定需要モデルから得られる道路整備の混雑緩和便益は、少なくとも今回の対象地域においては過大推計である可能性は強く、今後も統合モデルの精緻化を含めて研究を続ける必要性が示されたといえる。なお、代替手段の混雑緩和便益の追加に関しては、セカンドベスト下の便益評価になるため、供給者余剰の変化を含めた注意深い取り扱いが要求され<sup>6),7),8)</sup>、今後の課

題として挙げておく。

## 参考文献

- Williams, H. C. W. L., and Moore, L. A. R.: The appraisal of highway investments under fixed and variable demand, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 24, No. 1 pp. 61-81, 1990.
- 太田勝敏: 利用者便益の推定, 中村英夫(編)「道路投資の社会経済評価」, 第6章, pp. 101-121, 東洋経済新聞社, 1997.
- Coombe, D.: Induced traffic: What do Transportation models tell us?, *Transportation*, Vol. 23, No. 1, pp. 83-101, 1996.
- Oppenheim, N.: *Urban travel demand modeling: from individual choices to general equilibrium*, John Wiley & Sons, N. Y., 1995.
- Maruyama, T., Muromachi, Y., Harata, N., and Ohta, K.: The combined modal split/assignment model in the Tokyo metropolitan area, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4, No. 2, pp. 293-304, 2001.
- 城所幸弘: ネットワークに対する費用便益分析-理論と実務への応用-, *運輸政策研究*, Vol. 4, No. 4, pp. 2-10, 2002.
- 金本良嗣: 交通投資の便益評価・消費者余剰アプローチ, 日交研シリーズ A-201, 1996.
- 上田孝行, 森杉壽芳: Second Best 下での社会資本整備便益の計測について, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, 第IV部, pp. 380-381, 1997.