

交通プロジェクトの便益評価

- 体系と課題 -

本稿では、交通投資の便益評価に用いられる基本的な3つのモデル（一般モデル、完全代替モデル、ロジットモデル）を解説し、それらの長所・短所を述べ、相互の関連を示す。主要な貢献の1つは、これら3つのモデルは並立するものではなく、完全代替モデルやロジットモデルは一般モデルの特殊なケースに該当するため、基本的には一般モデルを用いて便益評価を行えばよいことを明示したことである。また、本稿では、得られた結果を実際の便益評価に適用できるように、例題を用いた平易な解説も行う。

キーワード 交通、投資、便益、評価、ロジットモデル

城所幸弘

KIDOKORO, Yukihiko

東京大学空間情報科学研究センター助教授

1 はじめに

費用便益分析は、ミクロ経済学の実務的な応用という側面を持ち、これまですでに多くの教科書が書かれている^{注1)}。しかしながら、驚くべきことに、交通プロジェクトの便益評価を、ミクロ経済学と整合的な形で基礎から応用まで一貫して取り扱っている教科書は存在しない。このような状況は、交通プロジェクトの便益評価が費用便益分析の中の主要な部分を占めるということと鑑みると非常に残念なことである。日本のように最近費用便益分析が用いられるようになった場合は特にそうであり、ミクロ経済学を整合的に応用して便益評価を論じた基礎的文献の不足は、実際の便益評価に多大な混乱をもたらす恐れがある。したがって、本稿では、ミクロ経済学に基づく便益評価モデルを構築し、それと整合的な便益評価方法を導出することを目的とする。

本稿では、まず、交通プロジェクトの便益評価の際に用いられる3つの基本的モデルを解説し、その相互の関係を示す。その3つのモデルとは、一般モデル、完全代替モデル、ロジットモデルである。一般モデルとは、最も汎用的なモデルであり、効用関数を特定化せず、したがって、各ルートの代替・補完関係も自由であることにその特徴がある。完全代替モデルとは、交通需要はある点からある点への移動の需要から生じる派生需要であり、どのようなルートを通るかは効用に影響を与えないと考える見方をモデル化したものである。そこでは、各ルートは完全に代替的になる。ロジットモデルとは離散的選択モ

デルを交通需要予測・便益評価に応用したものである。ロジットモデルは、交通需要を各消費者の確率的な行動の結果として捉えて、その確率分布にガンベル分布を用いて導出される。本稿の主要な貢献の1つは、これら3つのモデルは並立しているのではなく、完全代替モデルやロジットモデルは一般モデルの特殊ケースに過ぎないという点を明確に示した点である。したがって、便益評価では基本的には一般モデルを用いればよいことがわかる。さらに、本稿では、3つのモデルの長所・短所を明確に示し、それらを現実の便益評価に用いるときにどのような点に注意すべきかという点も述べている。また、今後の実際の便益評価の参考になるように、どのように便益を計算すればよいかを例題を用いて解説している。

なお、城所(2002)は、交通プロジェクトの便益評価を「ネットワーク」という観点から捉えなおし、正しく便益評価を行えばネットワークであることを考慮する必要がないことを示している。本稿では2点間のネットワークだけに焦点を絞って分析するが、本稿での分析に城所(2002)の結果を応用すれば、どのような複雑なネットワークでも本稿の分析が成立することがわかる。城所(2002)は、そこで導出された結果をもとに、現在の鉄道整備の便益評価の指針である、運輸政策研究機構(1999a)の便益評価方法の誤りを指摘しているが、それに対し上田他(2002)は反論を寄せている。本稿の内容全体が上田他(2002)への回答を示したものになっているが、上田他(2002)へのより具体的な回答を次号の紙上討議で述べる。

本稿の構成は以下のとおりである。2章で基本的な3

つのモデルを示し、それらの長所、短所、実際の便益評価に用いるときの問題点を明示する。3章では、2章の結果を、例題を用いて解説する。4章では、現在、便益評価に関してどのような問題があるかを述べて、本稿を締めくくる。

2 モデル

本章では、交通プロジェクトの便益評価に関して、基本的な3つのモデルを解説し、その長所・短所を述べる。なお、本稿では、合成財に関して線形である、擬線形の効用関数を考える。擬線形の効用関数の下では、Varian (1992) が示しているように、消費者余剰と等価変分 (EV)、補償変分 (CV) は一致する。より一般的な擬線形でない効用関数を考えれば、これら3つの便益指標は異なった値を与えるが、Willig (1976) が示したように、消費者余剰とEV、CVの間の差は一般的に大きくないので、擬線形の効用関数を考えてこの差を無視しても、実務上の費用便益分析には十分である。また、擬線形の効用関数は、常木 (2000) が示しているように、ゴーマン型選好の一例である。したがって、擬線形の効用関数のもとでは、代表的消費者の仮定が満たされ、シトフスキーパラドックスが生じない。その点でも擬線形の効用関数は有用である。

図 1 のような簡単な2点間モデルを考える。A点とB点が2つのルート(ルート1、ルート2)で結ばれているとする。ルート1とルート2は、同種の交通手段であってもよいし、別種の交通手段であってもよい。例えば、ルート1、ルート2とも自動車交通であると考えてもよいし、ルート1は自動車交通、ルート2は鉄道とを考えてもよい。ルート1の交通需要を x^1 、ルート2の交通需要を x^2 とする。城所 (2002) は、ネットワークを正しく定義して分析すれば、ネットワーク自体の持つ効果は存在しないことを示している。したがって、議論の本質を示すためには、2点間ネットワークを考えれば十分であり、 N 点間ネットワークの場合は、その単純な拡張になる。

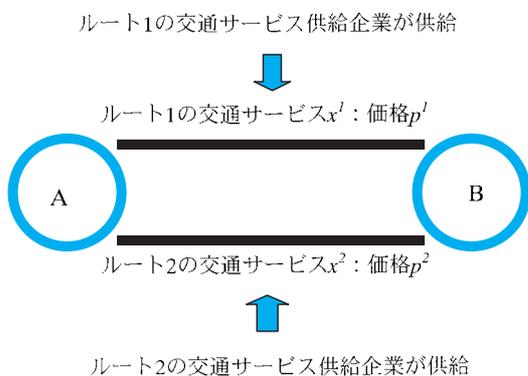


図 1 モデルの図解

2.1 一般モデル

まず、最も汎用的なモデルから始めよう。本稿では、このモデルを一般モデルと呼ぶ。最近の金本 (1996) や城所 (2002) も一般モデルの1つの例として位置づけることができる。このモデルの特徴は、ルート1とルート2の間に、代替的、補完的等の関係をあらかじめ仮定せず、一般的な効用関数を用いることである。このモデルでは効用関数は、

$$U = z + u(x^1, x^2) \quad (1)$$

とかける。ここで、 z は交通サービス以外の財をまとめた合成財であり、価格を1に基準化する。ルート1、ルート2の交通サービスの一般化価格(時間費用を含む)をそれぞれ p^1, p^2 とすると、予算制約は

$$y = z + p^1 x^1 + p^2 x^2 \quad (2)$$

である。ここで、 y は稼得可能所得である(2)を(1)に代入して z を消去すると、効用関数は

$$U = y - p^1 x^1 - p^2 x^2 + u(x^1, x^2) \quad (3)$$

と変形できる(3)を x^1, x^2 に関して最大化すると、

$$p^1 = u_1(x^1, x^2) \equiv \frac{\partial u(x^1, x^2)}{\partial x^1} \quad (4)$$

$$p^2 = u_2(x^1, x^2) \equiv \frac{\partial u(x^1, x^2)}{\partial x^2} \quad (5)$$

が得られ、これらより、交通サービス需要関数

$$x^1 = x^1(p^1, p^2) \quad (6)$$

$$x^2 = x^2(p^1, p^2) \quad (7)$$

が求められる。なお、以下では、右下添え字 i は、 i 番目の変数に関する偏微分を表すとする。

ルート1、ルート2の交通サービスの一般化価格 p^1, p^2 はそれぞれ、

$$p^1 = t^1 + TC^1(x^1, I^1) \quad (8)$$

$$p^2 = t^2 + TC^2(x^2, I^2) \quad (9)$$

であるとする。ここで、 t^1, t^2 は、各ルートで消費者が負担する料金等の金銭的費用、 I^1, I^2 は、各ルートでの交通投資、 $TC^1(x^1, I^1)$ 、 $TC^2(x^2, I^2)$ は(金銭換算された)時間費用である。時間費用は、交通需要の増加関数であり、交通投資の減少関数である、すなわち、 $TC_1^1(x^1, I^1) > 0$ 、 $TC_2^1(x^1, I^1) < 0$ 、 $TC_1^2(x^2, I^2) > 0$ 、 $TC_2^2(x^2, I^2) < 0$ であると仮定する。本稿を通じ、交通投資 I^1, I^2 は外生変数であるとし、それらの変化がもたらす便益に焦点を当てる。また、後で詳述するように、金銭的費用 t^1, t^2 も外生変数であると考えられる。したがって(6) (9)を解くことにより、一般均衡需要関数 $x^1(t^1, t^2, I^1, I^2)$ 、 $x^2(t^1, t^2, I^1, I^2)$ が、外生変数 t^1, t^2, I^1, I^2 の関数として求められる。

各ルートでの交通サービス供給企業の総費用関数を、 $C^1(x^1)$ 、 $C^2(x^2)$ とする^{注2)}。ここで、各ルートで交通量が

増加すると総費用が増えると仮定する。すなわち、 $C'' > 0$ かつ $C^2' > 0$ である。ルート1, ルート2の交通サービス供給企業は、消費者が支払う金銭的費用 t^1, t^2 を受け取り、交通サービスを供給する。その利潤は

$$\pi^1 = t^1 x^1 - C^1(x^1) \quad (10)$$

$$\pi^2 = t^2 x^2 - C^2(x^2) \quad (11)$$

となる。ルート1やルート2が航空会社や鉄道会社であるなら、 π^1, π^2 は、それらの企業の(経済学的)利潤である。自動車交通であるなら、消費者は自ら交通サービスを供給し、消費していると考えればよい。今、例として、ルート1での自動車交通の供給にかかる金銭的な社会的限界費用(道路の損耗, 燃料代等)が300円, 消費者が支払う燃料代・燃料税等の金銭的費用が500円, 時間費用が1,000円であるとしよう。消費者は1,500円を支払い、自動車交通サービスを受ける。この1,500円が時間費用を含んだ自動車交通の価格である。しかし、供給に必要な社会的限界費用(時間費用を含む)は1,300円なので、200円が余剰として残る。この200円を消費者が受け取る利潤と考えればよい(なお、この分が政府の収入を増すと考えても、議論に影響はない。)

本稿の分析では、交通サービスの金銭的費用 t^1, t^2 は外生変数であると考えているが、この点は、交通サービスの金銭的費用が政府によって規制されていると考えるとわかりやすい。これは現実的には妥当な考え方である。例えば、自動車交通の金銭的費用で、燃料税や高速道路代は重要な部分を占めるが、それらは政府によって規制されている。また、航空や鉄道の運賃も政府によって規制されている。ただ、この仮定は議論を簡単にするためのものであり、もちろん他のケースを考えることもできる。例えば、各ルートで独占企業が交通サービスを供給しており、利潤最大化行動に基づいて金銭的費用を決定しているとしても本稿の分析をそのまま適用することができる。つまり、金銭的費用が内生変数であっても外生変数であっても、本稿の議論には影響がない。

総余剰 SW は、消費者の効用と各ルートの交通サービスの供給企業の利潤を足し合わせたものになる(3)、(10)(11)より、総余剰 SW は

$$\begin{aligned} SW &= U + \pi^1 + \pi^2 \\ &= y - p^1 x^1 - p^2 x^2 + u(x^1, x^2) + t^1 x^1 - C^1(x^1) + t^2 x^2 - C^2(x^2) \end{aligned} \quad (12)$$

とかける。

今、ルート1の交通投資 I^1 が交通投資を行わない場合(Withoutの場合)の I^{1wo} から交通投資を行う場合(Withの場合)の I^{1w} に増加した場合の便益を考えよう^{注3)}(これ以降、右上添え字の wo, w で、それぞれ、Withoutの場合、Withの場合の変数であることを示す。この場合の

便益 ΔSW は、

$$\begin{aligned} \frac{dSW}{dI^1} &= -TC_2^1 x^1 + (-p^1 - TC_1^1 x^1 + u_1 + t^1 - C^{1'}) \frac{dx^1}{dI^1} \\ &\quad + (-p^2 - TC_1^2 x^2 + u_2 + t^2 - C^{2'}) \frac{dx^2}{dI^1} \end{aligned} \quad (13)$$

より(4)(5)(8)(9)を使って整理すると、

$$\Delta SW = \int_{p^{1wo}}^{p^{1w}} x^1 dp^1 + \int_{x^{1wo}}^{x^{1w}} (t^1 - C^{1'}) dx^1 + \int_{p^{2wo}}^{p^{2w}} x^2 dp^2 + \int_{x^{2wo}}^{x^{2w}} (t^2 - C^{2'}) dx^2 \quad (14)$$

と求められる(14)の右辺第1項は、ルート1に関する消費者余剰の変化、右辺第2項はルート1に関する生産者余剰(=利潤)の変化、第3項はルート2に関する消費者余剰の変化、第4項はルート2に関する生産者余剰の変化である(14)は、

$$\Delta SW = \int_{p^{1wo}}^{p^{1w}} x^1 dp^1 + \int_{x^{1wo}}^{x^{1w}} (t^1 - C^{1'}) dx^1 + \int_{x^{2wo}}^{x^{2w}} (p^2 - SMC^2) dx^2 \quad (15)$$

と変形できる。ここで、 $SMC^2 \equiv C^{2'} + TC^2 + TC_1^2 x^2$ はルート2の交通サービスの社会的限界費用であり、金銭的限界費用 $C^{2'}$ と時間的限界費用 $TC^2 + TC_1^2 x^2$ の合計である。

(14)(15)で示されていることを経済学的に解釈してみよう(14)の右辺第1項は、ルート1に関する消費者余剰の変化であるが、これは一般均衡需要曲線で図った消費者余剰の変化である。通常のマーシャルの需要曲線は、他の財の価格や所得を一定として描かれる。ここで考えている擬線形の効用関数の下では、マーシャルの需要曲線は所得に依存しないが、それでも、他の財の価格には依存する。ルート1の交通投資によって、ルート1の交通サービスの一般化価格は変化するが、当然、これは、ルート1とルート2の代替、補完等の関係によって、ルート2の交通サービスの一般化価格にも影響を与える。その結果、ルート1の交通投資は、ルート1のマーシャルの需要曲線上において、一般化価格の低下をもたらすのではなく、ルート1のマーシャルの需要曲線自体をシフトさせる。図2で示すように、ルート1の交通投資がない場合の均衡点とルート1の交通投資がある場合の均衡点は、別のマーシャルの需要曲線上にある。ルート1の一般均衡需要曲線は、これらの均衡点を結んだもので、ルート2との相

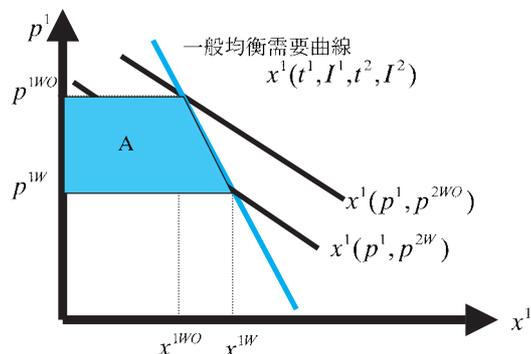


図2 ルート1の消費者余剰

相互作用を考慮しており、実際の均衡が通る軌跡になる。この一般均衡需要曲線上で測った消費者余剰の変化(Aの面積)がルート1の消費者余剰の変化になる。実務的な交通需要予測では、他の交通サービスの一般化価格を一定としたマーシャルの需要曲線を推定することは困難であるため、交通投資後の実際の交通需要を予測している。したがって、実務的な交通需要予測は、マーシャルの需要曲線を推定しているというよりは、一般均衡需要曲線上の交通需要の変化を推定していると考えられる。

次に(14)の右辺第2項は、ルート1の生産者余剰の変化であり、これは利潤の変化になる。図3を基に説明しよう(図3では、図の描きやすさのために、一般化価格が社会的限界費用を上回る場合を扱っているが、一般化価格が社会的限界費用を下回る場合であっても同様である。)Bの面積は、交通投資がない場合のルート1の生産者余剰を表している。これは、消費者のルート1の総支払額 $p^{1WO} x^{1WO} = \{t^1 + TC^1(I^{1WO})\} x^{1WO}$ から、ルート1の交通サービスの社会的限界費用曲線 $SMC^1(I^{1WO}) = C^1(x^{1WO}) + TC^1(x^{1WO}, I^{1WO}) + TC_1^1(x^{1WO}, I^{1WO}) x^{1WO}$ の下側の面積を引いたものである。社会的限界費用曲線の下側の面積は、 $\int SMC^1 dx^1 = C^1 + TC^1 x^1$ より、時間費用を含んだ総費用を示す。したがって、Bの面積は、

$$p^{1WO} x^{1WO} - \int SMC^1 dx^1 = t^1 x^{1WO} - C^1(x^{1WO}) = \pi^{1WO} \quad (16)$$

となり、ルート1の交通投資がない場合の、ルート1の交通サービス供給企業の利潤に一致する。同様に、Cの面積は、ルート1の交通投資がある場合の、ルート1の交通サービス供給企業の利潤となる。以上より、ルート1の生産者余剰の変化は、利潤の変化として求められ、Cの面積からBの面積を引いたものになる。

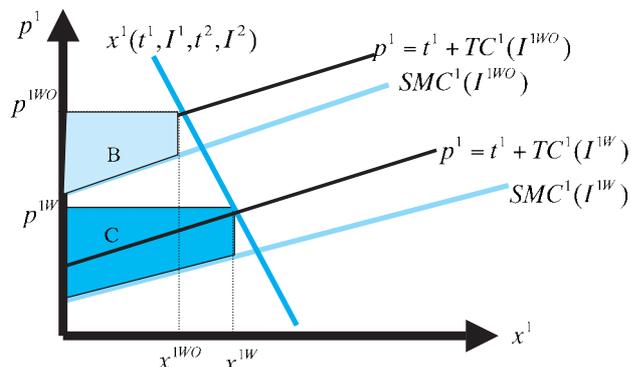


図3 ルート1の生産者余剰

今度は、ルート2を考えよう(14)の右辺第3項は、ルート2の消費者余剰の変化である。ルート1同様、一般均衡需要曲線を求めて、それに沿って消費者余剰を計算すればよい。図4に示したように、ルート2では(9)が一般均衡需要曲線となる。これは、ルート2の交通サービス

のマーシャルの需要曲線が、ルート1の交通投資によってどのようにシフトしようとも、ルート2の均衡は必ず(9)を満たすからである(注4)。したがって(9)に沿って消費者余剰を求めればよく、Dの面積がルート2に関する消費者余剰の増加である。

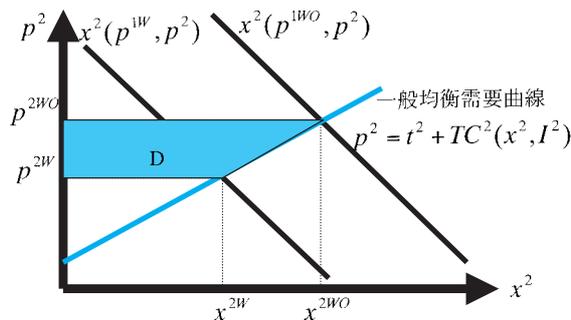


図4 ルート2の消費者余剰

(14)の右辺第4項は、ルート2の生産者余剰の変化である(16)より、利潤(=生産者余剰)の変化は、消費者の総支払額の変化から時間費用を含んだ社会的総費用の変化を引いたものになる。図5より、収入の減少はEの面積とFの面積の合計、総費用の減少はFの面積とGの面積の合計である。したがって、最終的に、ルート2の生産者余剰の変化は、Eの面積の減少とGの面積の増加になる(Fの部分は、相殺される。)

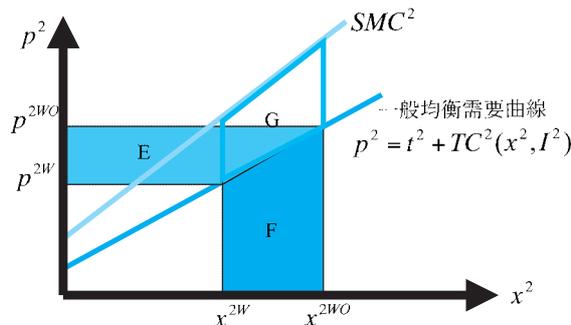


図5 ルート2の生産者余剰

(15)は、ルート2で起きる変化を別の観点から見直したものである。図4,5より、Dの面積とEの面積は同じなので、Dの消費者余剰の増加とEの生産者余剰の減少は相殺され、Gの面積だけが残る。Gの面積は、価格と限界費用の差がもたらす純外部性(死重損失)の変化を表している。これが(15)の右辺第3項の部分に当たる。(15)で示された結果は、Mohring(1976)の議論に一致しており、また、Boadway and Bruce(1984)で展開されている歪みのある経済(Distorted Economy)での便益の測定法を交通投資プロジェクトの便益評価に応用したものになっている。

3章で例示するように、当然(14)でも(15)でもどちらの方法を使用しても、正確な便益を求めることができる。

また (14) と (15) は、正しい便益評価をする限り必ず一致するので、両方の方法で便益を求めることにより、行った便益評価が正しいかどうかチェックすることもできる。

一般モデルを用いた便益評価は、最も汎用的であり、いかなる場合でも正確な便益を導出することができる。(交通プロジェクトの便益評価でなくとも一般モデルはそのまま適用することができる。)ただし、実務的には一般モデルには1つ欠点がある。実務では、一般均衡需要曲線を全域にわたって推定することは不可能であるといつてよく、せいぜい、交通投資がある場合とない場合の交通需要がわかるだけといった場合が多い。この場合、一般モデルでは、新しい交通サービスが利用可能になる場合の便益を正確に求めることが難しくなる。新しい交通サービスが利用可能になる場合、交通サービスが存在しない場合の交通需要はゼロである。一般モデルでは、交通投資がない場合の一般化価格の情報は必須であるため、交通需要がゼロであるときの一般化価格を求める必要がある。しかし、実務的にはこれは非常に困難である。この問題はHarberger(1972)といった初期の便益評価の研究でも認識されていたが、一般モデルの枠内で経済理論と整合的な形でこの問題を解決した研究は筆者の知る限り存在しない。

2.1の一般モデルの長所と短所をまとめておこう。

長所：最も汎用的なモデルであり、すべての便益評価に適用可能である。

短所：新しい交通サービスが整備される場合は、交通サービスが存在しない場合の一般化価格を求める必要があるが、そのためには一般均衡需要曲線を完全に推定する必要がある。これは実務的に困難である。

2.2 完全代替モデル

交通サービスは、派生需要であるといわれることが多い。これは(一部の乗り物マニアやドライブ好きを除いて)交通サービス自体から効用を得ることが目的ではなく、ある地点へ移動するというトリップが目的であり、その目的より、交通サービスの需要が発生するからである。本節では、交通サービスを派生需要であると考えてモデルを展開しよう。

派生需要であることを考えた場合に2-1の一般モデルと異なる点は、効用関数が特定化されることである。すなわち、交通需要が派生需要である場合、効用関数は

$$U = z + u(x^1 + x^2) \quad (17)$$

となる。この効用関数は、ルート1とルート2が完全に代替的であり、A点とB点の間の総交通需要 $x^1 + x^2$ だけが部分効用 u に影響を与えることを示している。以降、この

モデルを完全代替モデルと呼ぼう。完全代替モデルでは、ルート1とルート2が完全に代替的なので、 $p^1 = p^2$ であれば両方のルートが、 $p^1 > p^2$ であればルート2だけが、 $p^1 < p^2$ であればルート1だけが利用されることになる。

したがって、 $p = \min\{p^1, p^2\}$ と定義すると、A-B間のトリップの一般化価格は常に p であり、予算制約は、

$$y = z + p(x^1 + x^2) \quad (18)$$

となる(18)を(17)に代入すると、

$$U = y - p(x^1 + x^2) + u(x^1 + x^2) \quad (19)$$

と変形できる(19)を、 x^1, x^2 に関して最大化すると、

$$p = u'(x^1 + x^2) \quad (20)$$

が得られる。また、ルート1、ルート2の交通サービスの一般化価格は、2.1の一般モデル同様、

$$p^1 = t^1 + TC^1(x^1, I^1) \quad (21)$$

$$p^2 = t^2 + TC^2(x^2, I^2) \quad (22)$$

を満たす。

$p = p^1 = p^2$ のときは(20)(22)より、ルート1の交通量 x^1 とルート2の交通量 x^2 が決定される。 $p = p^1 < p^2$ のときは、 $x^2 = 0$ であり(20)(21)より、 x^1 が求められる。同様に、 $p = p^2 < p^1$ のときは、 $x^1 = 0$ であり(20)(22)より、 x^2 が求められる。

交通サービス供給企業に関しては、2.1の一般モデルと同様である。したがって(10)(11)(19)より、総余剰 SW は

$$\begin{aligned} SW &= U + \pi^1 + \pi^2 \\ &= y - p(x^1 + x^2) + u(x^1 + x^2) + t^1 x^1 - C^1(x^1) + t^2 x^2 - C^2(x^2) \end{aligned} \quad (23)$$

とかける。

ルート1の交通投資 I^1 がWithoutの場合の I^{1wo} からWithの場合の I^{1w} に増加した場合の便益は(20)を使って整理すると、

$$\Delta SW = \int_{p^w}^{p^{wo}} (x^1 + x^2) dp + \int_{x^{1wo}}^{x^{1w}} (t^1 - C^{1'}) dx^1 + \int_{x^{2wo}}^{x^{2w}} (t^2 - C^{2'}) dx^2 \quad (24)$$

となる(24)の右辺第1項はA-B間の交通需要に関する消費者余剰の変化、第2項はルート1に関する生産者余剰の変化、第3項はルート2に関する生産者余剰の変化である。

(17)より明らかのように、完全代替モデルは、一般モデルの1つの特殊ケースなので、一般モデルと同様の形で書くこともできる。すなわち(24)は、

$$\begin{aligned} \Delta SW &= \int_{p^w}^{p^{wo}} x^1 dp^1 + \int_{x^{1wo}}^{x^{1w}} (t^1 - C^{1'}) dx^1 + \int_{p^w}^{p^{wo}} x^2 dp^2 + \int_{x^{2wo}}^{x^{2w}} (t^2 - C^{2'}) dx^2 \\ &= \int_{p^w}^{p^{wo}} x^1 dp^1 + \int_{x^{1wo}}^{x^{1w}} (t^1 - C^{1'}) dx^1 + \int_{x^{2wo}}^{x^{2w}} (p^2 - SMC^2) dx^2 \end{aligned} \quad (25)$$

と整理することができる。一般モデルとの違いは、ルート1とルート2の交通サービスの消費者余剰の計算の際

に用いる一般化価格が $p \equiv \min\{p^1, p^2\}$ となっている点である。ルート1とルート2の交通サービスの一般化価格が共に $p \equiv \min\{p^1, p^2\}$ となることにより、完全代替モデルは、新規に交通サービスが整備される場合の便益計算が実務的に困難であるという一般モデルの欠点を回避できる。ルート1が既存のルートであり、新規にルート2を作るプロジェクトを例にとろう。Withoutの場合、ルート2の一般化価格は無限大であると考えれば、ルート1の一般化価格がA-B間のトリップの一般化価格になる。すなわち、 $p = p^1 < p^2 = \infty$ である。Withの場合、ルート2の交通サービスが供給されるが、ルート1とルート2は完全代替のため、ルート1とルート2の両方が使用されているなら $p = p^1 = p^2$ が成立する^{注5)}。(もちろん、新規のルート2だけが利用されることになるなら、 $p = p^2 < p^1$ である。)つまり、完全代替モデルでは、現実に利用されているルートの一般化価格だけで便益を測定することができる。したがって、新規にルート2ができる場合のWithoutの一般化価格は、完全代替であるルート1の一般化価格で代用することができるのである。

完全代替モデルは、新しく交通サービスができる場合であっても、簡単に便益が求められるため、実務上は有用な方法である。しかし、Arnott and Yan(2000)が指摘するように、各ルートが完全代替であるという仮定はかなり強い仮定であることに留意する必要がある。例えば、東京-大阪間を考え、ルート1が新幹線、ルート2が航空であるとし、新幹線と航空は完全に代替的であるとしよう。このとき、もし、他の条件を一定にして航空運賃がわずかでも下がれば、すべての人が、航空の容量制約に達するまで、航空を利用することになる。この状況は現実的にはかなり不自然な状況だろう。もちろん、このような不自然な状況は、消費者の異質性等を明示的に考慮すれば回避できる可能性がある。しかし、同質な消費者を前提にした場合、各ルートが完全代替であるという仮定は、現実とうまく符合しない可能性がある。

2.2の完全代替モデルの長所と短所は以下のようにまとめることができる。

長所：新しい交通サービスが整備される場合でも実務上簡単に便益評価を実行できる。

短所：各ルートが完全に代替であるという強い仮定であって、現実をうまく説明できない可能性がある。

2.3 ロジット(Logit)モデル

ロジット(Logit)モデルとは、離散的選択モデルを交通需要予測・便益評価に応用したものである。ある消費者は1単位、A地点とB地点の間のトリップを需要するとしよう。ルート1を選んだときの効用は V^1 、ルート2を選んだ

ときの効用は V^2 であるとする。ここで、 V^1, V^2 は確率的に変動する項 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ を含み、 $V^1 = v^1 + \varepsilon^1, V^2 = v^2 + \varepsilon^2$ であるとする。 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ は、確定的な効用 V^1, V^2 では捉えられない部分を含んでいる。例えば、 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ は、観察不可能な消費者の嗜好の差を表していると考えればよい。 $V^1 > V^2$ ならルート1が、 $V^1 < V^2$ ならルート2が選ばれることになるが、 $V^1 > V^2$ であるか $V^1 < V^2$ であるかは、確率的に変動する項 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ に依存する。ルート1が選ばれる確率 $P1$ は

$$P1 = \text{Prob}(V^1 > V^2) = \text{Prob}(v^1 - v^2 > \varepsilon^2 - \varepsilon^1) \quad (26)$$

となる。ここで、 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ に関して特定の確率分布を仮定すれば、 $P1$ が求められる。 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ の確率分布に関して自然な選択として考えられるのは正規分布であろう。実際、正規分布を仮定したものがプロビット(Probit)モデルである。しかし、プロビットモデルは、計算上困難を伴うことが多いという欠点を持つ。そこで、正規分布によく似た確率分布を持つガンベル分布を用いたロジットモデルが多用されている。 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ が独立に

$$F(\varepsilon) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\right\}$$
 という分布関数を持つガンベル分布^{注6)}に従うと仮定すれば、

$$P1 = \frac{\exp(v^1/\mu)}{\exp(v^1/\mu) + \exp(v^2/\mu)} \quad (27)$$

が求められる(ルート2が選ばれる確率 $P2$ は $P2 = 1 - P1$ となる。)総消費者数を X 人すると、ルート1と2の交通需要 x^1, x^2 は

$$x^1 = X \times P1 = X \frac{\exp(v^1/\mu)}{\exp(v^1/\mu) + \exp(v^2/\mu)} \quad (28)$$

$$x^2 = X \times P2 = X \frac{\exp(v^2/\mu)}{\exp(v^1/\mu) + \exp(v^2/\mu)} \quad (29)$$

と求められる。

今、計量経済学的手法によって、確定的な効用 v^1, v^2 が、 $v^1 \equiv \alpha - \beta p^1, v^2 \equiv \alpha - \beta p^2$ ($\alpha \geq 0, \beta > 0$) として推定できたとしよう(ここで、ルート1を選んでもルート2を選んでも、所得に関する項は共通なので、所得の項を計量経済学的に推定することは不可能なことに注意せよ)。ルート1の交通投資によって、ルート1の交通サービスの価格が低下した場合の消費者余剰の変化は、Small and Rosen(1981)を応用して

$$\Delta U = \frac{\mu X}{\lambda} \left\{ \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^{iW}/\mu) - \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^{iWO}/\mu) \right\} \quad (30)$$

となる。ここで、 λ は所得の限界効用である。確定的な効用 v^1, v^2 の推定の際に所得を含めることはできないため、直接的に所得の限界効用 λ を推定することはできない。しかし、 v^1, v^2 が一般化価格の関数として求められる場合、ロワの恒等式を適用することで間接的に所得の限

界効用を求めることができる。この場合、 v^1, v^2 は条件付間接効用関数となる。「条件付」である理由は、 v^1, v^2 が、各ルートが選ばれたときの効用であるからである。この条件付間接効用関数にロウの恒等式(Roy's Identity)を適用して、

$$\lambda = \frac{\partial v^1}{\partial y} = -\frac{\partial v^1}{\partial p^1} x^{1c} \quad (31)$$

となる。ここで x^{1c} は、ルート1かルート2のどちらかを選ぶとしたときの、個人のルート1の交通サービスの「条件付」需要量である。例えば、毎日の通勤交通需要を分析するのであれば(往復を1単位と定義して) $x^{1c} = 1$ である(もちろん、1日必ず2往復する交通需要を考えれば、 $x^{1c} = 2$ である)。なお(30)では、生産者余剰は含まれないため、総余剰を計算するときには、生産者余剰を別に加える必要がある。

ロジットモデルは、代表的消費者の効用最大化行動からも導くことができるため、ミクロ経済学的根拠も持つ。Anderson et al.(1992)で展開されているアプローチを応用してこのことを見てみよう。以下の代表的消費者の効用最大化問題を考える。

$$\max_{\{z, x^1, x^2\}} U = \beta z + \alpha(x^1 + x^2) - \mu \left(x^1 \ln \frac{x^1}{X} + x^2 \ln \frac{x^2}{X} \right)$$

$$(M) \text{ s.t. } y = z + p^1 x^1 + p^2 x^2 \\ x^1 + x^2 = X$$

この効用最大化問題(M)を解くと、以下の需要関数が得られる。

$$x^1 = X \frac{\exp\left(\frac{\alpha - \beta p^1}{\mu}\right)}{\exp\left(\frac{\alpha - \beta p^1}{\mu}\right) + \exp\left(\frac{\alpha - \beta p^2}{\mu}\right)} \quad (32)$$

$$x^2 = X \frac{\exp\left(\frac{\alpha - \beta p^2}{\mu}\right)}{\exp\left(\frac{\alpha - \beta p^1}{\mu}\right) + \exp\left(\frac{\alpha - \beta p^2}{\mu}\right)} \quad (33)$$

ここで $v^1 \equiv \alpha - \beta p^1$ 、 $v^2 \equiv \alpha - \beta p^2$ とすると(28)(29)のロジットモデルの需要関数になる(32)(33)を効用関数に代入して整理すると、支出関数が

$$e(v^1, v^2, u) = \frac{u}{\beta} - \frac{\mu X}{\beta} \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^i / \mu) \quad (34)$$

として求められる。ここで、 u は効用水準である。これより、ルート1の交通投資によって、ルート1の交通サービスの価格が低下した場合の消費者余剰の変化は(31)より、

$$\lambda = \frac{\partial v^1}{\partial y} = -\frac{\partial v^1}{\partial p^1} x^{1c} = -\frac{-\beta}{1} = \beta \quad (35)$$

なので、

$$\begin{aligned} \Delta U &= e(v^{1wo}, v^{2wo}, u) - e(v^{1w}, v^{2w}, u) \\ &= \frac{\mu X}{\beta} \left\{ \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^{iwo} / \mu) - \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^{iw} / \mu) \right\} \\ &= \frac{\mu X}{\lambda} \left\{ \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^{iwo} / \mu) - \ln \sum_{i=1}^2 \exp(v^{iw} / \mu) \right\} \quad (36) \end{aligned}$$

となり(30)に一致する。

効用最大化問題(M)から明らかのように、ロジットモデルは一般モデルの1つの特殊ケースである。したがって、(14)(15)で示した総余剰の計算式はロジットモデルの下でもなお有効である(32)(34)より、ルート1の交通投資によって、ルート1の交通サービスの価格が低下した場合の消費者余剰の変化は、

$$\begin{aligned} \int_{p^1}^{p^{1wo}} \frac{\partial e(v^1, v^2, u)}{\partial p^1} dp^1 &= \int_{p^1}^{p^{1wo}} \left(\frac{\partial e}{\partial v^1} \frac{\partial v^1}{\partial p^1} + \frac{\partial e}{\partial v^2} \frac{\partial v^2}{\partial p^2} \frac{\partial p^2}{\partial p^1} \right) dp^1 \\ &= -\frac{\mu X}{\beta} \int_{p^1}^{p^{1wo}} \left(\frac{-\frac{\beta}{\mu} \exp(v^1 / \mu)}{\sum_{i=1}^2 \exp(v^i / \mu)} + \frac{-\frac{\beta}{\mu} \exp(v^2 / \mu)}{\sum_{i=1}^2 \exp(v^i / \mu)} \frac{\partial p^2}{\partial p^1} \right) dp^1 \\ &= \int_{p^1}^{p^{1wo}} x^1 dp^1 + \int_{p^2}^{p^{2wo}} x^2 dp^2 \quad (37) \end{aligned}$$

となり(14)の右辺第1項のルート1の消費者余剰と右辺第3項のルート2の消費者余剰が導出できる。

また、ロジットモデルでは、ガンベル分布を用いることにより、効用関数の形があらかじめ計算に便利な形に特定化されるため、新しい交通サービスができる場合の一般化価格の設定という困難な問題を回避することができる。例えば、ルート2が交通プロジェクトによって開設される新規のルートだとして。このとき、ルート1、ルート2をはじめから分析に含めておき、交通プロジェクトがない場合は、所要時間が v^{2wo} であると考えれば、 $v^{2wo} = -$ となる。このとき、 $\exp(v^{2wo}/u) = 0$ となるので(30)において、ルート2の影響はなくなり、プロジェクトがない場合のルート2の一般化価格を明示的に知る必要がないのである。

本章で用いているガンベル分布

$$F(\varepsilon) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\right\}$$

のスケールパラメーターと呼ばれる。ガンベル分布の分散は $\frac{\mu^2 \pi^2}{6}$ であるので、スケールパラメーター μ が大きいほど分布の広がりが大きくなる。Small(1992)が指摘しているように、通常は、 $\mu = 1$ と仮定されることが多い。もし、 μ がゼロに近づくと、分散もゼロに近づくため、確率的変動項 $\varepsilon^1, \varepsilon^2$ の与える影響も小さくなる。この場合、ロジットモデルは、効用最大化問題(M)で $\mu \rightarrow 0$ とすれば容易にわかるように、完全代替モデルの特殊ケースになる。

ロジットモデルは、交通需要予測から便益評価まで

一貫して行うことが可能な優れたモデルである。しかし、効用最大化問題(M)を見れば明らかのように、ここまでの議論は総交通需要が変わらないという条件の下で得られたものである。したがって、総交通需要が、交通プロジェクトがある場合とない場合とで変化する場合は(30)によって、消費者余剰の変化を求めることができない。

ロジットモデルを使用して、総交通需要が、交通プロジェクトがある場合とない場合で変化する場合の便益を測定するには、若干の工夫が必要である。第一の解決策は、総消費者数を一定として、選択肢に「移動しない」を含めることである。このとき、消費者は、「移動しない」「ルート1で移動する」「ルート2で移動する」という3つの選択肢から、必ず1つを選ぶことになるので、3つの選択肢の合計は固定されている。したがって、3つの選択肢の確定的な効用を推定できれば(30)を適用することができる(もちろんその場合は、 \ln の中の \exp の項は3つになる。)第二の解決策は、選択をツリー上にすることである。これは、ネステッド(入れ子型)ロジットモデルや階層型ロジットモデルと呼ばれている。以下のような例を考えよう。最初のステージでは、すべての消費者が「移動する」か「移動しない」という選択を行い、次のステージでは「移動する」という選択を行った人が、「ルート1で移動する」か「ルート2で移動する」か選択をする。このようなネステッドロジットモデルを用いても、総交通需要が変化する状態を叙述できる。注意しなければならないのは、このようなネステッドロジットモデルを用いた場合、消費者余剰の変化はもはや(30)のようにはならない点である。Small(1992)、Oppenheim(1995)、Verboven(1996)が示しているように、この場合は(30)の $\ln \sum \exp(\cdot)$ の部分が、 $\ln \sum \exp\{\ln \sum \exp(\cdot)\}$ のようになる。つまり、 $\ln \sum \exp(\cdot)$ 自体が入れ子型になるのである(厳密に証明されてはいないが、Small(1992)、Oppenheim(1995)、Verboven(1996)の結果は、階層が n のネステッドロジットモデルでは、 $\ln \sum \exp(\cdot)$ も n 階層の入れ子になることを示唆している。)以上のように、ネステッドロジットモデルを用いたときは、その階層に応じて(30)を入れ子型にして拡張した便益指標を用いる必要があり、便益指標が複雑化する。

2.3のロジットモデルの長所と短所は以下のようにまとめることができる。

長所：交通需要予測と統合的な便益評価が可能である。

新しい交通サービスが整備される場合でも実務的に便益評価を実行できる。

短所：簡単に便益を計算するには総交通需要が一定という条件が必要である。総交通需要が変化する場

合は、ロジットモデルの設計を工夫して、それに対応した便益指標を用いなければならない。

2.4 まとめ

2章では、代表的な3つの便益評価モデルを解説し、その長所・短所を示した。3つの便益評価モデルの関係は図6のようになる。つまり、最も一般的なものが一般モデルであり、その中に、完全代替モデルやロジットモデルが含まれる。また、ロジットモデルは、スケールパラメーター μ がゼロのとき、完全代替モデルの特殊ケースになる。これらの関係から、一般モデルで成立することは完全代替モデルやロジットモデルで成立するが、その逆は成立しないことがわかる。

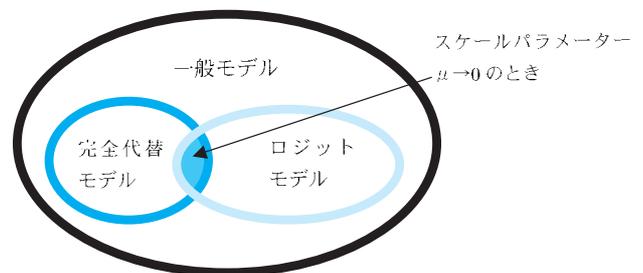


図6 3つのモデルの関係

このような特徴を踏まえると、基本的には一般モデルで便益を求めるのが妥当である。新しい交通サービスを整備する場合は、現状では、3つの選択肢がある。第一の方法は、一般モデルを用い、需要曲線を完全に推定する方法である。第二の方法は、一般モデルに完全代替モデルを組み合わせる方法である。すなわち、新規に供給される交通サービスと最も代替性の高い既存交通サービスとの間で、完全代替を仮定し、その間では完全代替モデルを用い、その他においては、一般モデルを用いるのである。具体的にどのような計算になるかは、3章の例4を参照されたい。第三の方法は、ロジットモデルを用いることである。ただし、この場合には、プロジェクトを実施する場合としない場合で総交通需要が変化するのであれば、2.3で示したような工夫が必要になる点は注意しなければならない。

3 数値例

この章では、2章の分析で示した理論的な結果を例に当てはめて解説しよう。

第一に分析する以下の例は、城所(2002)で取り上げたのと同じく、運輸政策研究機構(1999a)の都市間鉄道建設プロジェクトの例(pp. 104-124)である。

城所(2002)は、運輸政策研究機構(1999a)同様、1分

当たり39.3円の時間価値を用い、この例の消費者余剰を230888円としている。これに対し、運輸政策研究機構(1999a)の方法での消費者余剰は286660円であり、運輸政策研究機構(1999a)の方法が、消費者余剰の過大推定を導くことを指摘している。この例では、ロジットモデルを使い交通機関分担をしており、条件付間接効用関数が明示されている。また、プロジェクトが実施しない場合(Without)と実施する場合(With)で全交通需要が変化していないので(30)を用いて正確な消費者余剰を導き出すことができる(なお、この例では消費者余剰だけに焦点を当てることとする。)

表 1 都市間鉄道建設プロジェクト

Without	所要時間(分)	(金銭的)費用(円)	需要量(人/日)
鉄道	190	11000	100
航空	120	14000	110
自動車	400	5500	10
全需要			220

プロジェクトを実施しない場合

With	所要時間(分)	(金銭的)費用(円)	需要量(人/日)
鉄道	140	11000	135
航空	120	14000	80
自動車	400	5500	5
全需要			220

プロジェクトを実施する場合

$$\begin{aligned} V &= -0.0169T - 0.000248F = -0.000248(F + 68.1T) \\ &= -0.000248p \end{aligned} \quad (38)$$

を用い、消費者余剰を求めてみよう。ここで、 F は金銭的費用(円)、 T は所要時間(分)であり、 T に係る係数68.1は1分あたりの時間価値を示す。1時間あたりに直すと4,089円である。 T と F に表1の値を当てはめれば、Withoutの場合の $\ln \sum \exp(\cdot)$ は、

$$\begin{aligned} \ln \sum \exp(\cdot) &= \ln \{ \exp(-0.0169 \times 190 - 0.000248 \times 11000) \\ &\quad + \exp(-0.0169 \times 120 - 0.000248 \times 14000) \\ &\quad + \exp(-0.0169 \times 400 - 0.000248 \times 5500) \} \\ &= -4.96 \end{aligned} \quad (39)$$

のように計算できる(なお、ここではガンベル分布のスケールパラメーターを1とした。)同様にして計算すると、Withの場合の $\ln \sum \exp(\cdot)$ は、-4.55である。これらより、(30)(35)を用いて計算すると、

$$\Delta U = \frac{220}{0.000248} \{-4.55 - (-4.96)\} = 358834 \text{ (円)} \quad (40)$$

となる(なお、四捨五入によって、左辺の式が示す値と右辺の計算結果は若干異なっている。この点は以下のすべての分析において当てはまる。)

(37)式に示したように、ロジットモデルの便益も一般モデルの便益計算方法によって求めることができるので、

次にその方法で求めてみよう。運輸政策研究機構(1999a)では、時間価値として1分当たり39.3円の時間価値を用いているが、時間価値をそろえて比較しなければ意味がないため、ここでは、ロジットモデルで求められた1分当たり68.1円という時間価値を用いる。この例では、鉄道以外の一般化価格は変化しないとされているので、鉄道についてのみ、消費者余剰を計算すればよい。プロジェクトを実施しない場合の鉄道の一般化価格は $190 \times 68.1 + 11,000 = 23,900$ (円)であり、プロジェクトを実施する場合の鉄道の一般化価格は $140 \times 68.1 + 11,000 = 20,500$ (円)である。ロジットモデルより得られる、プロジェクトを実施しない場合の鉄道需要は

$$\frac{\exp(V^{WO}_{\text{鉄道}})}{\exp(V^{WO}_{\text{鉄道}}) + \exp(V^{WO}_{\text{航空}}) + \exp(V^{WO}_{\text{自動車}})} \times 220 = 83 \quad (41)$$

であり、プロジェクトを実施する場合の鉄道需要は

$$\frac{\exp(V^{W}_{\text{鉄道}})}{\exp(V^{W}_{\text{鉄道}}) + \exp(V^{W}_{\text{航空}}) + \exp(V^{W}_{\text{自動車}})} \times 220 = 128 \quad (42)$$

である(表1の需要量はロジットモデルで求めた需要量と大きく異なっているため、ここでは、ロジットモデルで求めた需要量を用いる。ロジットモデルを用いたと述べていながら、ロジットモデルで求めた需要量と大きく食い違った交通需要を掲載している点で、この例は整合的に設計された良い例とはいえない。)

一般均衡需要曲線を線形で近似すると、

$$\Delta U = \frac{83 + 128}{2} (23900 - 20500) = 359298 \text{ (円)} \quad (43)$$

のように、消費者余剰を求めることができる(32)から容易にわかるように、ロジットモデルで求められる需要関数は線形ではない。したがって、線形で近似をすると誤差が生じるが、その誤差の部分を除いては正確な消費者余剰を求めることができる。ロジットモデルは一般モデルの1つの特殊形なので(37)で示したように、一般モデルで便益を求めること自体は全く問題がない。

運輸政策研究機構(1999a)で用いられている、各交通機関の一般化価格の加重平均を各地点間の一般化価格とする方法を用いた場合、誤差がより大きくなる(41)、(42)と同様にして、プロジェクトを実施しない場合の航空需要、自動車需要は、128人、9人、プロジェクトを実施する場合の航空需要、自動車需要は86人、6人と計算できる。プロジェクトを実施しない場合の加重平均した一般化価格は

$$\begin{aligned} &(68.1 \times 190 + 11000) \times \frac{83}{220} + (68.1 \times 120 + 14000) \times \frac{128}{220} \\ &+ (68.1 \times 400 + 5500) \times \frac{9}{220} = 23300 \text{ (円)} \end{aligned} \quad (44)$$

であり、プロジェクトを実施する場合の加重平均した一般化価格は

$$(68.1 \times 140 + 11000) \times \frac{128}{220} + (68.1 \times 120 + 14000) \times \frac{86}{220} + (68.1 \times 400 + 5500) \times \frac{6}{220} = 21500(\text{円}) \quad (45)$$

である。運輸政策研究機構(1999a)の方法では、この一般化価格の変化が全交通需要に当てはまると考え、消費者余剰を

$$\Delta U = \frac{220 + 220}{2} (23300 - 21500) = 388959(\text{円}) \quad (46)$$

と求めている(46)と(40)の差は(43)と(40)の差のような、曲線を直線で近似することによる誤差ではなく、ロジットモデルにおいて、加重平均した一般化費用を用いることから生じる誤差である^{注7)}。運輸政策研究機構(1999a)の方法では、一般的には正しい消費者余剰を得ることができないということをもう一度警告しておく。

第二に分析する以下の例は、鉄道が高速化され、自動車の混雑が緩和する場合を念頭に置いた例である。

表 2 鉄道高速化プロジェクト

Without	所要時間 (分)	(金銭的) 費用(円)	うち(税抜き) 燃料代(円)	うち 燃料 税(円)	一般化価 格(円)	需要量 (人/日)
鉄道	50	500			2500	200
自動車	60	300	150	150	2700	100
全需要						300

プロジェクトを実施しない場合

With	所要時間 (分)	(金銭的) 費用(円)	うち(税抜き) 燃料代(円)	うち 燃料 税(円)	一般化価 格(円)	需要量 (人/日)
鉄道	30	600			1800	250
自動車	50	250	125	125	2250	70
全需要						320

プロジェクトを実施する場合

この例では以下のような仮定をおく。

- (仮定1) 計算の簡単化のために時間価値は1分当たり40円である。
- (仮定2) 鉄道は平均費用価格規制によって規制されており、鉄道会社の利潤はゼロである(例4では鉄道会社の利潤が生じる場合を取り扱う。)
- (仮定3) 鉄道の金銭的費用は運賃であり、自動車の金銭的費用は燃料代である。燃料税率は100%である、つまり、燃料代のうち、半分が燃料税である。
- (仮定4) 鉄道と自動車の完全代替を仮定しない。したがって、均衡での一般化価格には差がある。
- (仮定5) プロジェクトを実施しない場合とプロジェクトを実施する場合で総交通需要が変動する。
- (仮定4) より、この例は完全代替モデルに対応しない。

また(仮定5)より(30)で消費者余剰が計算できる単純なロジットモデルは適用できない。したがって、一般モデルを用いて総余剰を計算する。

まず(14)に基づき、総余剰を各ルートでの消費者余剰と生産者余剰の変化として求めてみよう。

(鉄道の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (2500 - 1800) \times (200 + 250) = 157500 \quad (47)$$

(自動車の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (2700 - 2250) \times (100 + 70) = 38250 \quad (48)$$

(鉄道の生産者余剰の変化)

$$= 0 \quad (49)$$

(自動車の生産者余剰の変化)

$$= (250 \times 70 - 125 \times 70) - (300 \times 100 - 150 \times 100) = -6250 \quad (50)$$

(47)から(50)を合計すると、総余剰の変化は189500(円)として求められる。

次に(15)に基づき、総余剰を(鉄道の消費者余剰の変化)+(鉄道の生産者余剰の変化)+(自動車の純外部性の変化)として求めてみよう。自動車の純外部性の変化を求めるということは、図5のGの面積を求めることに等しい。Gは社会的限界費用曲線と一般均衡需要曲線に囲まれた面積であるが、社会的限界費用を知らなくても計算できる。社会的限界費用曲線の下側の面積(積分値)は、時間費用を含んだ社会的総費用を示すので、GとFの面積の合計は、社会的総費用の変化である。この面積を、一般均衡需要曲線の下側の面積Fで表されている私的総費用の変化から引くことによってGの面積が求められる。すなわち、

(Fの面積)

$$= 0.5 \times (70 - 100) \times (2250 + 2700) = -74250 \quad (51)$$

(G + Fの面積)

$$= (50 \times 40 + 125) \times 70 - (60 \times 40 + 150) \times 100 = -106250 \quad (52)$$

なので、自動車の純外部性の変化は、-74250 - (-106250) = 32000(円)であるが、これは(48)と(50)の合計に等しい。この値に(47)と(49)の鉄道の消費者余剰の変化と鉄道の生産者余剰の変化を加えれば総余剰の変化が189500(円)として求められる。

(14)で示されている方法と(15)で示されている方法は、当然、全く同じ値をもたらすのでどちらを用いてもよい。また、両方の方法で計算することにより、計算した値が正しいかどうかチェックすることもできる。

第三の例に移ろう。この例は、都市高速道路(自動車1)の拡張により、都市高速道路の混雑が緩和され、一般道(自動車2)の混雑も緩和される状況を念頭に置いた例である。

表 3 都市高速道路改善プロジェクト

Without	所要時間(分)	(金銭的)費用(円)	うち 高速料金(円)	うち(税抜き)燃料代(円)	うち 燃料税(円)	一般化価格(円)	需要量(人/日)
自動車1	55	800	500	150	150	3000	100
自動車2	60	600	0	300	300	3000	200
全需要							300

プロジェクトを実施しない場合

With	所要時間(分)	(金銭的)費用(円)	うち 高速料金(円)	うち(税抜き)燃料代(円)	うち 燃料税(円)	一般化価格(円)	需要量(人/日)
自動車1	49	840	600	120	120	2800	150
自動車2	56	560	0	280	280	2800	180
全需要							330

プロジェクトを実施する場合

この例では以下のような仮定をおく。

(仮定1)計算の簡単化のために時間価値は1分当たり40円である。

(仮定2)自動車の金銭的費用は高速料金と燃料代の合計である。燃料税率は100%である。

(仮定3)都市高速道路の拡張によって、高速料金は100円値上げされる。

(仮定4)都市高速道路(自動車1)と一般道(自動車2)は完全に代替的である。

(仮定5)プロジェクトを実施しない場合とプロジェクトを実施する場合で総交通需要が変動する。

(仮定4)より、この例では、都市高速道路と一般道の一般化価格は均等化する。また(仮定5)より(30)で消費者余剰が計算できる単純なロジットモデルは適用できない。したがって、この例では、一般モデルか完全代替モデルを用いて総余剰を計算する。

まず、一般モデルを用いて便益を計算してみよう。例2で示したように、一般モデルで便益を分析するには(14)と(15)の両方の方法で求めることができる。繰り返になるが、もう一度両方の方法を示しておこう。

(14)に基づき、総余剰を各ルートの消費者余剰と生産者余剰の変化として求めてみると、

(自動車1の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (3000 - 2800) \times (100 + 150) = 25000 \quad (53)$$

(自動車2の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (3000 - 2800) \times (200 + 180) = 38000 \quad (54)$$

(自動車1の生産者余剰の変化)

$$= (840 \times 150 - 120 \times 150) - (800 \times 100 - 150 \times 100) = 43000 \quad (55)$$

(自動車2の生産者余剰の変化)

$$= (560 \times 180 - 280 \times 180) - (600 \times 200 - 300 \times 200) = -9600 \quad (56)$$

より、その合計は96400(円)である。

今度は(15)に基づき、自動車2の純外部性の変化を求める。図5のFの面積(一般均衡需要曲線の下側の面積)からGとFの面積の合計(社会的限界費用曲線の下側の面積)を引けばよいので、

(Fの面積)

$$= 0.5 \times (180 - 200) \times (2800 + 3000) = -58000 \quad (57)$$

(G + Fの面積)

$$= (56 \times 40 + 280) \times 180 - (60 \times 40 + 300) \times 200 = -86400 \quad (58)$$

より、自動車2の純外部性の変化は $-58000 - (-86400) = 28400$ (円)である。この値に、(53)と(55)の自動車1の消費者余剰の変化と自動車1の生産者余剰の変化を加えれば総余剰の変化が96400(円)として求められ、(14)で求めた値と一致する。

仮定2より、この例では、自動車1と自動車2は完全代替である。したがって(24)で示した方法を用いても便益を計算することができる。確認のため、この方法でも便益を計算してみよう(24)で示したように、完全代替の場合は、自動車1と自動車2をまとめて取り扱うことができ、消費者余剰の変化が

(自動車1と自動車2の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (3000 - 2800) \times (300 + 330) = 63000 \quad (59)$$

と求められる。この値に、自動車1の生産者余剰の変化(55)と自動車2の生産者余剰の変化(56)を加えれば総余剰の変化が96400(円)として求められ(14)(15)を使って求めた値と一致する。完全代替の場合、3つの方法で総余剰を導出できるため、求められた便益が正しいかどうかを相互にチェックすることができる。

なお、この例では、運輸政策研究機構(1999a)の加重平均をした一般化価格を用いる方法でも正しい便益を計算することができる。言うまでもなく、完全代替の場合では、各ルートの一般化価格は均等化するため、各ルートの一般化価格と各ルートの一般化価格を加重平均した一般化価格は一致する。したがって、この場合はたまたま運輸政策研究機構(1999a)の方法は正解を与える。しかし、この場合は、そもそも、わざわざ加重平均する必要がない。つまり、加重平均した一般化価格を使うことが実質的に意味がない場合しか、加重平均した一般化価格を用いては正解を得られないということであり、運輸政策研究機構(1999a)の方法は実用的な有用性がないといえる。

表 4 都市内新線建設プロジェクト

Without	所要時間 (分)	時間換算 混雑費用(分)	総所要時間 (分)	(金銭的)費用 (円)	うち(税抜き) 燃料代(円)	うち燃料税 (円)	鉄道会社平均 費用(円)	一般化価格 (円)	需要量 (人/日)
鉄道1	50	10	60	450	0	0	400	2850	300
自動車	70	0	70	400	200	200	/	3200	200
全需要									500

プロジェクトを実施しない場合

With	所要時間 (分)	時間換算 混雑費用(分)	総所要時間 (分)	(金銭的)費用 (円)	うち(税抜き) 燃料代(円)	うち燃料税 (円)	鉄道会社平均 費用(円)	一般化価格 (円)	需要量 (人/日)
鉄道1	47	2	49	470	0	0	450	2430	120
鉄道2	43	4	47	550	0	0	500	2430	210
自動車	65	0	65	340	170	170	/	2940	180
全需要									510

プロジェクトを実施する場合

最後の例は、都市鉄道2が新規に開業することにより、都市鉄道1、自動車の混雑が緩和される状況を念頭に置いた例である。

この例では以下のような仮定をおく。

- (仮定1) 計算の簡単化のために時間価値は1分当たり40円である。
- (仮定2) 鉄道の金銭的費用は運賃であり、自動車の金銭的費用は燃料代である。燃料税率は100%である。
- (仮定3) 例2とは異なり、鉄道会社に利潤が発生する。また、鉄道2の開業により、鉄道1の需要が減り、これによって、鉄道1の平均費用、運賃が上昇し、乗客1人当たり利益も圧縮される。
- (仮定4) 鉄道1と鉄道2は完全代替であるが、鉄道と自動車は完全代替ではない。
- (仮定5) プロジェクトを実施しない場合とプロジェクトを実施する場合で総交通需要が変動する。

(仮定4)より、この例は完全代替モデルと一般モデルを組み合わせたものになっている。基本的にはこの場合は、一般モデルを用いればよいが、新規に交通サービスが整備される場合で、需要関数を完全に推定しない場合は一般モデルを全面的に用いることができない。したがって、基本的には一般モデルを用い、新規に整備される路線の部分だけ、完全代替モデルを用いることとする。なお(仮定5)より(30)で消費者余剰が計算できる単純なロジットモデルは適用できない点は例2、例3と共通である。

まず(14)に基づき、総余剰を各ルートの消費者余剰と生産者余剰の変化として求めてみよう。ここでは、鉄道1と鉄道2が完全代替であるので、新規に整備される鉄道2のプロジェクトを実施しない場合の一般化価格が鉄道1の一般化価格で代用できる点がポイントである。総余剰の変化は

$$\text{(鉄道1の消費者余剰の変化)} = 0.5 \times (2850 - 2430) \times (300 + 120) = 88200 \quad (60)$$

(鉄道2の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (2850 - 2430) \times (0 + 210) = 44100 \quad (61)$$

(自動車)の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (3200 - 2940) \times (200 + 180) = 49400 \quad (62)$$

(鉄道1)の生産者余剰の変化)

$$= (470 \times 120 - 450 \times 120) - (450 \times 300 - 400 \times 300) = -12600 \quad (63)$$

(鉄道2)の生産者余剰の変化)

$$= (550 \times 210 - 500 \times 210) - 0 = 10500 \quad (64)$$

(自動車)の生産者余剰の変化)

$$= (340 \times 180 - 170 \times 180) - (400 \times 200 - 200 \times 200) = -9400 \quad (65)$$

なので、それらの合計として170200(円)と求められる。

今度は(15)に基づき、総余剰を鉄道2の消費者余剰と生産者余剰の変化の合計に、鉄道1と自動車の純外部性の変化を加えたものとして求める。図5のFの面積(一般均衡需要曲線の下側の面積)からGとFの面積の合計(社会的限界費用曲線の下側の面積)を引くという手順は、例2、例3と変わらないが、ここでは、その作業を鉄道1と自動車についてそれぞれ行うことになる。

(鉄道1)のFの面積)

$$= 0.5 \times (120 - 300) \times (2430 + 2850) = -475200 \quad (66)$$

(鉄道1)のG + Fの面積)

$$= (49 \times 40 + 450) \times 120 - (60 \times 40 + 400) \times 300 = -550800 \quad (67)$$

より、鉄道1の純外部性の変化は $-475200 - (-550800) = 75600$ (円)である。また、

(自動車)のFの面積)

$$= 0.5 \times (180 - 200) \times (2940 + 3200) = -61400 \quad (68)$$

(自動車)のG + Fの面積)

$$= (65 \times 40 + 170) \times 180 - (70 \times 40 + 200) \times 200 = -101400 \quad (69)$$

より、自動車の純外部性の変化は $-61400 - (-101400) = 40000$ (円)である。これらの値に(61)と(64)の鉄道2

の消費者余剰の変化と鉄道2の生産者余剰の変化を加えれば総余剰の変化が170200(円)として求められ、先ほど求めた値と一致する。

仮定2より、この例では、鉄道1と鉄道2は完全代替であるため(24)で示したように、鉄道1と鉄道2の消費者余剰の変化をまとめて取り扱うこともできる。この場合は、(鉄道1と鉄道2の消費者余剰の変化)

$$= 0.5 \times (2850 - 2430) \times (300 + 120 + 210) \\ = 132300 \quad (70)$$

と求められる。この値に、鉄道1の生産者余剰の変化(63)、鉄道2の生産者余剰の変化(64)、自動車の消費者余剰の変化(62)、自動車の生産者余剰の変化(65)を加えれば総余剰の変化が170200(円)として求められる。もちろん、自動車の消費者余剰の変化(62)と生産者余剰(65)の変化の代わりに、自動車の純外部性の変化40000(円)を加えても総余剰の変化を170200(円)と正しく計算することができる。

4 おわりに

本稿では、便益評価に用いられる3つの基本モデルを分析し、その長所・短所を明確化した。得られた結論は、一般モデルはその特殊ケースとして、完全代替モデルとロジットモデルを含んでいるので、基本的には一般モデルを用いて便益を評価すればよいというものである。ただし、一般モデルは、新規に交通サービスが整備される状況では、需要曲線を全域にわたって推定できない場合、便益を推定できないという欠点を持つ。その場合には、効用関数を特定化することになるが、完全代替モデルやロジットモデルを用いて便益評価を行う必要がある。

最後に、今後の課題として3点を述べておきたい。第一は、新規に交通サービスが整備される場合に関する。本稿では、新規に交通サービスが整備される場合では、需要曲線を全域にわたって推定しない限り、一般モデルを用いては便益を推定することはできないことを示した。このような場合には、現状では、完全代替モデルやロジットモデルというより特殊な関数を用いるモデルを使用せざるを得ない。一般モデルの枠内で、新規に交通サービスが整備される場合の便益を実務的にどのように計算するかはまだ解決されていない問題である。

第二は、ボトルネックの取り扱いについてである。例えば、日本の国内航空ネットワークの中心である羽田空港のように、ボトルネックが発生しているとみなせる事例は多い。この場合であっても、ボトルネックの存在を極端な混雑が生じていると解釈すれば、本稿の分析が近似的には成り立つ。しかし、実務上簡便な形で、ボトルネックが

存在する場合の便益評価をどのように行うべきかについては、今後の研究が必要である。空港整備の便益評価の指針を示した運輸政策研究機構(1999b)においても、この点は今後の検討課題とされている。

第三は、税の取り扱いについてである。3章の例では、燃料代と燃料税を区分して計算している。これは、ガソリンは、消費税を除いて1リットル当たり約56円と他の財に比べてかなり重く課税されている現状を反映している。しかし、この点は、現状の便益評価では明確に考慮されていない。例えば、道路整備の便益評価の指針を示した道路投資の評価に関する検討委員会(1998)では、燃料税に関してどのような取り扱いをしているのかを明示していない。燃料税のような負担の大きな税は、便益計算上無視できないため、この取り扱いにより、便益計算の結果は大きく変わる。実際、Sugden(1999)は、各交通機関への課税が異なる現状に着目し、便益評価において、間接税をどのように取り扱うべきかを論じている。日本でも、日本の税体系を明示的に考慮して、便益評価における間接税の取り扱いを詳細に分析する必要がある。

謝辞：本稿を書くにあたり、八田達夫(東京大学)、金本良嗣(東京大学)、岡本亮介(政策研究大学院大学)、岡野行秀(創価大学)、Kenneth Small(University of California, Irvine)、田淵隆俊(東京大学)、竹内健蔵(東京女子大学)、手塚広一郎(福井大学)、常木淳(大阪大学)の各氏より、貴重な示唆、助言をいただいた。ここに記して感謝する。

注

注1)例えば、Lesourne(1975)、Sugden and Williams(1978)、Gramlich(1990)、Layard and Glaister(1994)、Brent(1996)、Nas(1996)、Boardman et al.(2000)を見よ。

注2)本稿では、交通投資の便益に焦点を当てるため、交通投資¹、²にかかる費用は交通サービス供給企業の総費用に含めない。

注3)なお、ルート2の交通投資が増加する場合も全く同様に分析できる。

注4)ルート2の金銭的費用が外生変数である場合(9)はルート1の交通投資によってシフトしないことに注意されたい。もし、ルート1の交通投資によって、ルート2の金銭的費用が変化するのであれば、一般均衡需要曲線は図-2同様、シフトする(9)上で、実際の均衡が通る点を結んだものになる。

注5)この点はWardrop(1952)で既に指摘されている。Wardrop(1952)は完全代替である道路ネットワークを念頭においていた。

注6)本稿では、ロケーションパラメータ(最頻値に一致)がゼロのガンベル分布を仮定する。

注7)この誤差の数学的特性については、次号の紙上討議で示す。

参考文献

- 1) Anderson, S. P., De Palma, A., and Thisse, J.-F., (1992), *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*, MIT Press.
- 2) Amott, R. and Yan, A., (2000), "The Two-Mode Problem: Second-best Pricing and Capacity", *Review of Urban and Regional Development Studies* 12, 170-199.
- 3) Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., and Weimer, D. L., (2000), *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*, Second Edition, Prentice Hall.

- 4) Boardway, R. W. and Bruce, N., (1984), *Welfare Economics*, Basil Blackwell.
- 5) Brent, R. J., (1996), *Applied Cost-Benefit Analysis*, Edward Elgar.
道路投資の評価に関する検討委員会(1998), 道路投資の評価に関する指針(案), 道路投資の評価に関する検討委員会.
- 6) Gramlich, E. M., (1990), *A Guide to Benefit-Cost Analysis Second Edition*, Waveland Press.
- 7) Harberger, A. C., (1972), *Project Evaluation*, University of Chicago Press.
- 8) 金本 良嗣 (1996), 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, 日本交通政策研究会.
- 9) 城所 幸弘 (2002), ネットワークに対する費用便益分析, 運輸政策研究 No.15, 2-10.
- 10) Layard, R. and Glaister, S., (1994), *Cost-Benefit Analysis Second Edition*, Cambridge University Press.
- 11) Lesourne, J., (1975), *Cost-benefit Analysis and Economic Theory*, North Holland.
- 12) Mohring, H., (1976), *Transportation Economics*, Ballinger Publishing Co.
- 13) Nas T. F., (1996), *Cost-Benefit Analysis Theory and Application*, Sage Publications.
- 14) Oppenheim, N., (1995), *Urban Travel Demand Modeling*, Wiley-Interscience Publication.
- 15) Small, K. A., (1992), *Urban Transportation Economics*, Harwood Academic Publishers.
- 16) Small, K. A., and Rosen, H. S., (1981), "Applied Welfare Economics with Discrete Choice Models," *Econometrica* 49, 105-130.
- 17) Sugden, R., (1999), The treatment of taxation in the cost-benefit appraisal of transport investment, A Report for the Department of the Environment, Transport and the Regions, U.K.
- 18) Sugden, R. and Williams, A., (1978), *The Principals of Practical Cost-Benefit Analysis*, Oxford University Press.
- 19) 常木 淳 (2000), 費用便益分析の基礎, 東京大学出版会.
- 20) 上田 孝行, 森杉 壽芳, 林山泰久, (2002), 交通整備事業の便益計測に関するいくつかの留意事項 城所論文を踏まえた再検討, 運輸政策研究 No.17, 23-35.
- 21) 運輸政策研究機構 (1999a), 鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル 99, 運輸政策研究機構.
- 22) 運輸政策研究機構 (1999b), 空港整備事業の費用対効果分析マニュアル 1999, 運輸政策研究機構.
- 23) Varian, H. R., (1992), *Microeconomic Analysis*, Norton.
- 24) Verboven, F., (1996), The Nested Logit Model and Representative Consumer Theory, *Economics Letters* 50, 57-63.
- 25) Wardrop, J. G., (1952), Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, reprinted in H. Mohring eds., *The Economics of Transport* I (Edward Elgar Publishing), 299-352.
- 26) Willig, R. D., (1976), Consumer's Surplus Without Apology, *American Economic Review* 66, 589-597.

(原稿受付 2003年1月9日)

Benefit-estimation of Transport Project - Basic Models and their Characteristics -

By Yukihiko KIDOKORO

Abstract: In this paper, we explain three basic models of benefit-estimation for transport projects, which are the general model, the perfect-substitute model, and the logit model, and show their merits and demerits. The main contribution of this paper is to clarify the relationship among these three models and show that the general model includes the perfect-substitute model and the logit model as special cases. This result suggests that we can basically rely on the general model, regardless of the estimation method of transport demand. After deriving theoretical results, we use examples to illustrate how to estimate the benefits of transport projects practically.

Key Words ; **transport, investment, benefit, appraisal, logit**
