

到達時分短縮による経済効果

野末 尚次

株式会社数理モデリング研究所

はじめに

列車の高速化に代表される輸送サービスの向上による効果は、1) 利用客へのサービスの向上、2) 企業の収益の向上の直接的な経済効果の外に、自動車から鉄道への転換等による間接的な経済効果（外部経済効果）があります。

鉄道は、利用自身が目的となる本質的需要というよりは、他所で何かを行うための移動という派生需要であり、この本質的需要をサポートするための社会資本としての意義があります。

しかしながら、これらを実現するための投資は比較的大規模で、投資回収に長い期間を要するため、公的な投資や助成を受ける場合が多くなります。

このような投資・助成の有効性を判断するために、費用便益分析を行うことが義務付けられており、そのためのマニュアル「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2005（国土交通省鉄道局監修）」が公開されています。

今回は、経済効果の判断のベースとなる需要予測、消費者余剰、外部経済効果について、基本的な考え方とその問題点、及び、筆者による改善案を解説します。

時間短縮と需要予測

時間短縮の効果を測定するためには、時間短縮により利用客がどれだけ増えるかが最大の課題です。

この利用客の予測には、確率効用理論をベースとした非集計型モデルが構築され、予測が行われています。

このモデルでは、図1に示すように、利用客が実際に利用した経路 x の時間、運賃、乗換回数等のデータを用いて、測定した効用 V_x を定義（ α 、 β 、 γ は未知のパラメータ）します。この V_x に、今回の測定の対象となっていない効用を確率変数として追加して、確率的効用関数 U_x を定義します。さらに、その時利用可能であった他の経路に対しても同様に効用関数を定義します。

経路の選択基準は、これらの対象となる路線の中で、確率的効用 U_x が最大の経路が選択されると考えます。

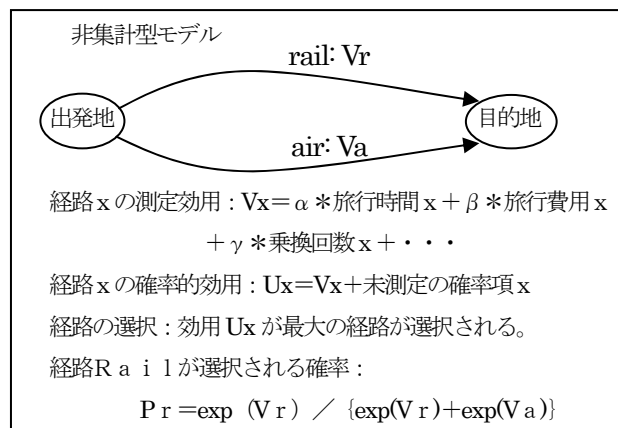


図1 非集計ロジット・モデル

確率分布が最大値の分布の場合には、経路 x が選択される確率 P_x は、図1に示した簡潔な表現となり、ロジット・モデルと呼ばれています。

パラメータ（ α 、 β 、 γ ）の推定では、先ず、実際の利用状況の調査を行い、各利用客 k の実績経路 x_k の選択確率 P_{xk} を作成します。実績データの再現確率は、実績経路の選択確率 P_{xk} の積となるので、この積が最大となるようにパラメータが決定されます。

幹線輸送の例では、「21世紀初頭の我が国の交通需要（運輸政策機構）」で、次のモデルが使用されています。

表1 幹線輸送を対象にしたモデル（部分）

項目	幹線所要時間	乗車外時間	費用	...
パラメータ	-0.0219	-0.0198	-0.000128	...

このパラメータの推定結果（調査の実施又は既存の文献から）が得られると、時間短縮 ΔT が実現した時の利用客の増加は、次式で計算できます。

時間短縮後の選択確率: P_r'

$$U_r' = \alpha * (\text{旅行時間 } r - \Delta T) + \beta * \text{旅行費用 } r + \gamma * \text{乗換回数 } r + \dots$$

$$P_r' = \exp(U_r') / \{\exp(U_r') + \exp(U_a)\}$$

しかし、このモデルを計算するためには、競合交通機関の経路や運賃等の情報が必要となりますが、線形の効

用関数の場合には、現在のシェアが分れば、簡単に計算可能です。

簡単な需要予測公式

いま鉄道のシェアがPの時、時間が ΔT 短縮した場合のシェアの増分 ΔP は、次式で与えられます。

$$\Delta P = P(1-P) (1 - \exp(-\alpha \Delta T)) / \{P + (1-P) \exp(-\alpha \Delta T)\}$$

横軸に現在のシェア、縦軸にシェアの増分をとり、 ΔT を変えた結果のプロットを図2に示します。

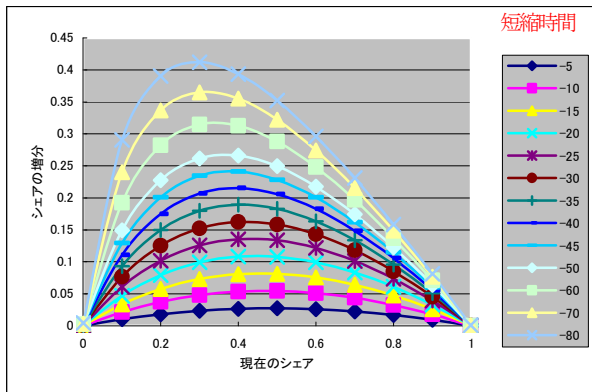


図2 時間短縮によるシェアの獲得

この結果より、ある線区の時間短縮を行った場合の輸送量の変化は、この区間を含む発着ゾーン毎の輸送量増加量 (ΔOD) の合計となります。発着ゾーンに対応したシェアPを用いて ΔP を計算し、その発着ゾーン間の自社の輸送量 (OD) を用いて、輸送量増加量 (ΔOD) は、次式で計算できます。

$$\Delta OD = OD * \Delta P / P$$

このモデルは、競合路線が2以上でも正しい結果が得られます。自社のデータのみを用いて予測できることが最大のメリットです。

また、他の輸送機関と競合が伯仲している (シェアが30%~40%付近) 場合に最大の効果があります。

これまでの議論は、線形の効用関数を用いたロジック・モデルの結果ですが、実際の適用場面ではいくつかの問題があります。

需要予測モデルの問題点

1) 空間的な規模の問題

このような線形の効用関数のモデルでは、時間短縮が旅行時間に関係なく影響が同一で、3時間の旅行で30分短縮しても、1時間の旅行で30分短縮してもシェアの増分は同じ結果となります。

大都市近郊のモデルの場合には、 $\alpha \approx 0.1$ のオーダーであり、長距離の幹線系のモデルの5倍程度の時間感

度を持っています。これは全体の所要時間が短くなると感度が高くなるという利用者の常識を示しています。

例えば、幹線系の平均所要時間を3時間程度、大都市圏旅客の平均所要時間を40分程度とすると、

$$\alpha 1 = 0.0219 * 180 = 3.942$$

$$\alpha 2 = 0.1 * 40 = 4$$

より、ほぼ $\alpha 1$ と $\alpha 2$ が等しくなります。この結果より、短縮効果の効用は、両者の平均値を用いて、下記のモデルに統一できます。

$$\text{時間短縮効用} = 3.971 * (\text{短縮時間} / \text{所要時間})$$

この結果より、時間短縮の効用は、全体の旅行時間に対する短縮時間の比率で決まると考えられます。先程の例では、それぞれ時間比率が1/6、1/2となるため、短縮効用は、0.67、1.96となり、所要時間の短い大都市圏の方が効果が大きくなります。

この点を表現するために、効用関数の対数を採用した対数効用モデルを筆者等は提案してきました。

$$\text{経路 } x \text{ の効用 : } V_x = \text{旅行時間 } x + \beta * \text{旅行費用 } x + \gamma * \text{乗換回数 } x + \dots$$

$$\text{対数効用 : } U_x = \alpha' * \text{Log}(V_x)$$

$$P_r = \exp(U_r) / \{\exp(U_r) + \exp(U_a)\}$$

これは、下記の形式になる。

$$P_r = V_r^{\alpha'} / \{V_r^{\alpha'} + V_a^{\alpha'}\}$$

図3 対数効用モデル

この場合には、時間の相対変化率を $\Delta R = \Delta T / V_r$ とすれば、 ΔR が小さい場合のシェアの増分式は下記の式となります。

$$\Delta P \approx P (1 - P) * (1 - \exp(-\alpha' \Delta R)) / \{P + (1 - P) \exp(-\alpha' \Delta R)\}$$

これは、線形の効用関数に対するシェアの増分式で、時間の絶対変化 ΔT の代わりに、相対変化 ΔR を使用した評価となっており、線形効用関数の問題点が解決されています。

上記の P_r の計算式は、昔米国の道路交通で使用され、鉄道技研でも採用しましたが、モデルの根拠が薄弱との批判を受けていました。確率効用理論をベースにした今回の議論で、その有効性の根拠は明らかです。

従って、所要時間の分布が大きく変化する幹線系の需要予測では、対数効用モデルの採用を推奨します。

尚、幹線系の全国的な需要予測モデルを用いて特定の線区の新設・改良を評価する場合には、対象地域の特性に応じたパラメータの感度の調整が必要です。筆者の経験では、全国モデルに対して、関東・東海・北陸・近畿を対象とし場合には約1.275倍、東北・北海道に対しては1.0倍、九州・中国に対しては0.75倍の感度の補正を

行っています。

2) 時間的な規模の問題

新幹線の開業等で大幅な時間短縮の結果、旅行時間が3時間程度になると、利用客の増加が知られています。

このような問題は、効用関数モデルでは説明できず、旅行時間の行動パターンへの影響を分析するアクティビティ分析が必要です。

旅行者が目的地に出かけるのは、そこで仕事や観光をするため、図4に示すように、旅行時間と目的地での有効時間の関係を示したプリズムで表現されます。

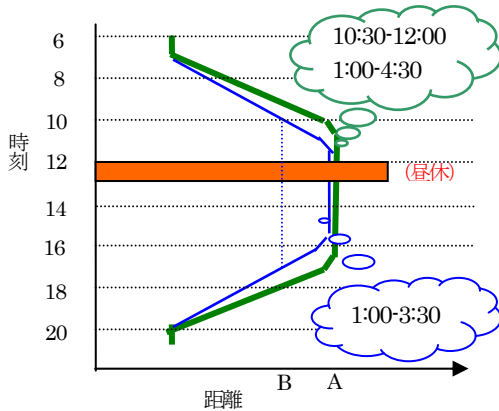


図4 旅行時間と有効な現地作業時間

図4は、朝7時に出発して夜8時に帰宅する行程で、目的地での往復に30分必要な場合に、幹線旅行時間が片道3時間と4時間の目的地(A)の作業時間のプリズムで表現しています。

この場合には、4時間での旅行はあまり有効でないが、3時間に短縮されると、非常に有効になることが分ります。遅い交通機関の場合には、この有効時間を確保するためには、B地点までしか行けないことになります。

従って、大規模な都市間の輸送時間の短縮では、この種のアクティビティ・ベースの検討が必要です。

このようなケースは、近郊区間の需要予測でも存在して、主婦の買物等の旅行では、主婦の自由時間のプリズムを考慮した列車設定等も課題になります。

利用者便益とアクセシビリティ

交通への投資の有効性は、その投資が与える社会的な便益で評価されます。その中で最も大きいものは、時間時間短縮による利用客(消費者)の効用の増加です。

しかし、図5のように複数の経路がある場合には、特定の線区の時間短縮が図られても、乗換の便利さ等で、他の経路を選択する旅客もいるので、この区間を代表する効用を決定する必要があります。この指標として、実

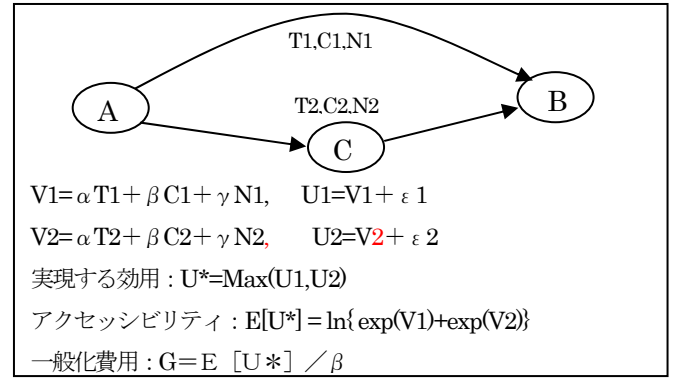


図5 アクセシビリティと一般化費用
現する効用(全ての経路の確率的効用の最大値)の期待値を採用して、アクセシビリティとよびます。

複数の経路が存在する場合には、下記の式となり見通しが良くありません。

$$ACC = \ln \left\{ \sum_i^m \exp(V_i) \right\}$$

アクセシビリティの分解公式

このアクセシビリティは、簡単な計算で、下記の項に分解できます。

$$ACC = (\bar{U} + H)$$

$$\bar{U} = \sum_1^k P_i \times U_i$$

$$H = -\sum_1^k P_i \times \ln(P_i)$$

ここで、 \bar{U} は、複数経路の効用値の重み付き平均から計算される平均効用値で、常識と一致します。

$$\bar{U} = \alpha \bar{T} + \beta \bar{C} + \gamma \bar{N} + \Lambda$$

$$\bar{T} = \sum_1^k P_i \times T_i \quad \text{平均所用時間}$$

$$\bar{C} = \sum_1^k P_i \times C_i \quad \text{平均費用}$$

$$\bar{N} = \sum_1^k P_i \times N_i \quad \text{平均乗り換え回数}$$

この常識的な平均効用に、 H という項が追加されています。これは、エントロピーと呼ばれる乱雑さを表す指標です。エントロピーは、 k 個の経路の選択確率が同一の時に最大となり、最大値は $\ln(k)$ となります。

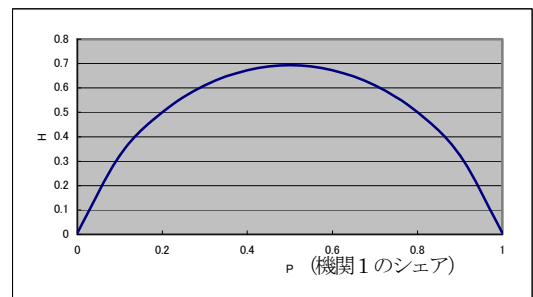


図6 エントロピー (2機関の場合)

図6より、1経路が独占している場合と、2経路が同一のシェアを持っている場合では、アクセシビリティ

が0.693違うことが分ります。

このアクセシビリティの差は、時間換算すると $\Delta T=0.693/\alpha$ より、幹線系で約32分、大都市圏で7分です。従って、並行経路では、この時間が短縮された単一経路と等価になります。

シェアが8:2の場合に0.5、9:1でも0.32のアクセシビリティの差が発生します。

大幅な時間短縮を行った場合に、対抗していた交通機関が撤退してしまったような場合には、 \bar{U} は改善されませんが、 H が減少するため当初の予想よりもアクセシビリティが改善されない場合があります。

消費者余剰

このアクセシビリティをコストのパラメータ β (符号は負) で除した値を一般化費用と呼びます。これは、時間や乗換等の不効用を貨幣価値に換算した値です。

交通需要の経済分析では、この一般化費用と実際の需要との関係を分析します。通常は、図7に示すような需要曲線を想定します。

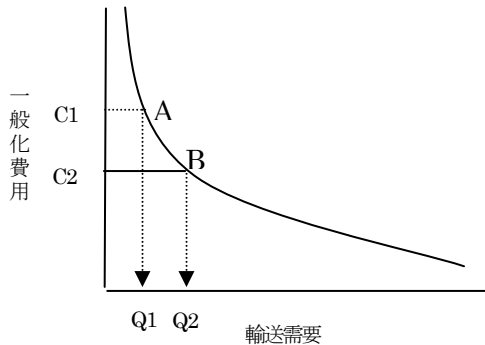


図7 需要曲線

一般化費用が C_1 の時の輸送需要を Q_1 とします。ある路線の時間短縮により、一般化費用が C_2 に低下し、輸送需要が Q_2 に増えたとします。このとき消費者余剰の増分は、次の値となります。

- ・ 既存の利用者： $C_1 - C_2$
- ・ 新規の利用者：この人の一般化費用 $-C_2$

消費者余剰は、 $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C_1$ で囲まれた図形の面積になりますが、これを台形で近似して、計算します。

$$UB = 0.5 (Q_1 + Q_2) * (C_1 - C_2)$$

この消費者余剰が利用者便益の増加分になり、これにより社会資本としての鉄道整備効果の評価が行われます。

この利用者便益の増加は、どのような改善が寄与しているのかを知るための近似的な分解公式が「97年版のマニュアル」にはありましたが、2005年版では削除されています。

これには、前述のアクセシビリティの分解公式により、図8に示す正確な利用者便益の分解公式が利用可能です。

利用者便益の分解公式

$$UB = UB_T + UB_C + UB_N + \Lambda + UB_H$$

$$UB_T = (\alpha / \beta) \times \Delta \bar{T} \times \bar{Q} \quad \text{平均時間短縮による便益増分}$$

$$UB_C = \Delta \bar{C} \times \bar{Q} \quad \text{平均費用節減による便益増分}$$

$$UB_N = (\gamma / \beta) \times \Delta \bar{N} \times \bar{Q} \quad \text{平均乗換回数減少による便益増分}$$

$$UB_H = (1/\beta)(H_1 - H_2) \times \bar{Q} \quad \text{ルートの多様化による便益増分}$$

図8 利用者便益の分解公式

外部経済効果

鉄道の時間短縮により、鉄道のシェアが増大することは、自動車の利用客が減少することを意味します。

これにより下記の環境改善が図られるので、これを貨幣

格化して、環境改善便益として計上します。

前述のマニュアルに従って説明します。

- ・ 局所的環境改善便益 (NOx 排出削減)
- ・ 地球環境改善便益 (CO2 排出削減)

これらの便益の計算は、次の2ステップで行われます。

1) 排出量の算定：自動車の種別 (大型・小型) と走行速度毎の走行 k m 当りの排出量のデータを使用して計算します。

CO2 の場合は、鉄道の排出量のも消費エネルギーをベースに積算します。

2) 貨幣換算：NOx に対しては、走行地域の属性に従って、1~292万円/トンの数値が与えられています。また、CO2 に関しては、炭素1トン当たり2,300円が与えられています。

これらの便益が、社会的便益に計上されます。

おわりに

鉄道の時間短縮の経済効果を推定するための仕組みを需要予測と費用便益分析の面で解説しました。

今回は、時間短縮に関連して解説しましたが、同じように、列車の直通化による乗継回数の削減効果、列車頻度の増加効果、運賃の低減効果等も同じ枠組みで評価可能です。

また鉄道自身の便益として、混雑緩和等も扱うことが可能です。

これらの評価のベースになるのは需要予測ですが、「調査を行い、線形効用の非集計ロジット・モデルを推定し、現況と合わない部分に補正を行ったモデルを開発し、それに基づいて予測を行う」という作業が定型化して行われているように思われます。

この部分は、もう少し新たな視点で考える必要があると思います。