

路線バスの運行実験の設計手法に関する研究

公共システム研究室 竹内隆博

1. はじめに

多くの自治体でコミュニティバスなどの運行実験が行われている。運行実験は、その期間における利用者の OD 交通量など、本格運行を検討するための情報を収集することを目的としている。つまり、住民にとって便利な路線を設計する本格運行とは異なり、どの区間にどれだけの利用者がいるのかを明らかにし、本格運行のリスクを減じる目的を持っている。その一方で、運行実験といえども、ある程度の利用者数を確保し、運行実験のコストを小さくすることが必要である。しかしながら、これらの目的をバランスよく達成するために、どのような考え方で運行内容を決定し、そこで得た情報を用いてどのように運行内容を修正するかについての手法はこれまでに十分には検討されていない。

そこで本研究では、実験的にバスを運行することを各区間の利用者数を学習する機会の行使ととらえ、どの機会を行使することが効率的かという観点で運行実験を設計する手法を、動的計画法を用いて検討する。

2. 動的計画法を用いた運行実験の設計

一般に運行実験においては、複数の期にそれぞれ異なる路線を設計し、その路線にバスを運行することで利用者数などのデータを収集する。このため、実験は1期から $T+1$ 期 ($T \geq 1$) までの任意の期間 t において、どのような路線を引くかを決定する状況である。なお、 $T+1$ 期は本格運行を行う期である。

1 期においては、既に存在する路線のデータなどが存在するはずである。これを、0 期のデータと呼ぶことにする。1 期には、そのデータを用いて運行実験の路線を設計する。路線が設計されるとその期における供給エリア内の地域特性とバスのサービス水準などが決定される。1 期目の運行実験を行うと、その期の期末に利用者数が明らかになる。

各期において路線を決定する際には $T+1$ 期から 1 期に向かって後ろ向きに検討する必要がある。これは、計画者がどのような評価関数を持っていようと

も、今期から最後の期までの評価値の合計を最適化するための路線の決定は、 t 期以降においてどの路線を引くのかに依存しているためである。

今、本格運行を行う期 ($T+1$ 期) であるとする。 $T+1$ 期には、0 期から T 期までのデータが得られているため、それらを用いて利用者数の推計式を導出することができる。例えば、バス停ごとにデータが得られている場合、以下のような式が推計できる。

$$y = \exp[\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m] \quad (1)$$

ここに、 β はパラメータ、 m は推計式における説明変数の数、 x はバス停周辺の地域特性（例えばバス停周辺の徒歩圏内人口、高齢化率）やサービス水準（例えば運行頻度、運賃）などであり、 y は単位期間内での任意のバス停での利用者数である。評価関数、評価値の詳細については後述する。

3. 評価関数とデータ

以前の期間に得られたデータから利用者数を推計する場合、利用者数を確実に推計することは不可能である。本研究では、利用者数の予測誤差を勘案してどれだけの利用者がいるかを総合的に評価しうる指標として VaR を用いる。この VaR が計画者の評価関数である。それを定式化すると次式を得る。

$$\text{VaR} = (\text{利用者数の平均}) - \theta \times (\text{利用者数の標準偏差}) \quad (2)$$

VaR はパーセンタイル値である。パラメータ θ が大きいほど、すなわち累積確率が大きいほど、小さな確率で生起する事象に計画者が着目することになる。

任意の t 期の期首に路線を決定し、その路線に対応した地域特性およびサービス水準のデータが決まる。これを x_t で表す。本研究では、各バス停ごとにデータが得られるものとする。すると、 t 期に決定した路線 ϕ_t に $n_t(\phi_t)$ 個のバス停があり、地域特性およびサービス水準を反映する説明変数の数が m であるとする

と、 X_t は次式で与えられる．

$$X_t = \begin{bmatrix} 1 & x_{t1}^1 & x_{t2}^1 & \cdots & x_{tm}^1 \\ 1 & x_{t1}^2 & x_{t2}^2 & \cdots & x_{tm}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{t1}^{n_t(\phi_t)} & x_{t2}^{n_t(\phi_t)} & \cdots & x_{tm}^{n_t(\phi_t)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

また，期末にはこの期間内の利用者数のデータが得られる．(対数変換済みの)利用者数のデータ Y_t は次式で与えられる．

$$Y_t = \begin{bmatrix} \ln[y_t^1] \\ \ln[y_t^2] \\ \vdots \\ \ln[y_t^{n_t(\phi_t)}] \end{bmatrix} \quad (4)$$

0期から t 期までに蓄積されたデータを以下のように表す．

$$Z_t = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_t \end{bmatrix} \quad U_t = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

4．各期における路線の決定と評価値

$T+1$ 期目の本格運行時には，0期から T 期までの運行実験で得られたデータ Z_T ， U_T が与えられているため，本格運行時に要する費用（評価値）は次式で表される．

$$V_{T+1}(Z_T, U_T) = \frac{1-\beta^k}{1-\beta} \min_{\phi_{T+1}} [C(\phi_{T+1}) - \lambda W_{\theta_2} [e(\phi_{T+1}) \exp[Y_{T+1}] | P(Y_{T+1} | (Z_T, X_{T+1})', (U_T, Y_{T+1})')]] \quad (6)$$

ここに， $\beta(0 < \beta < 1)$ は割引因子， k は本格運行のプロジェクティブ， W_{θ_2} はパラメータ θ_2 のもとの利用者数に関するVaRである．また， $C(\phi_{T+1})$ は路線 ϕ_{T+1} で本格運行を行った場合に要する費用， λ はバスの運賃， $e(\phi_{T+1}) \exp[Y_{T+1}]$ は路線 ϕ_{T+1} を引いた場合の利用者数の合計を表している．

また， $P(Y_{T+1} | (Z_T, X_{T+1})', (U_T, Y_{T+1})')$ は $T+1$ 期の状態が $(Z_T, X_{T+1})'$ ， $(U_T, Y_{T+1})'$ であるときの(対数変換済みの)利用者数が Y_{T+1} である事象の生起確率である．なお， $(Z_T, X_{T+1})'$ ， $(U_T, Y_{T+1})'$ におけるダッシュの印は転置を表している．

以下では， W_{θ_2} の求め方について述べる． $T+1$ 期には T 期までのデータを用いることができ，それによって得られる回帰式は次式で表される．ただし，この式において推計されたパラメータのベクトルを $\hat{\beta}_T$

とする．

$$Z_T \hat{\beta}_T = U_T \quad (7)$$

上式より正規方程式は以下ようになる．

$$(Z_T' Z_T) \hat{\beta}_T = Z_T' U_T \quad (8)$$

したがって，次式が成り立つ．

$$\hat{\beta}_T = (Z_T' Z_T)^{-1} Z_T' U_T \quad (9)$$

上式の $\hat{\beta}_T$ より， $T+1$ 期に路線 ϕ_{T+1} を引いた場合の(対数変換済みの)利用者数の平均，分散は以下ようになる．ただし， $n-r$ は自由度である．

$$\text{平均: } X_{T+1} \hat{\beta}_T$$

$$\text{分散: } \frac{U_T' U_T - (Z_T \hat{\beta}_T)' (Z_T \hat{\beta}_T)}{n-r} X_{T+1} (Z_T' Z_T)^{-1} X_{T+1}'$$

したがって，次式が成り立つ．

$$W_{\theta_2} [e(\phi_{T+1}) \exp[Y_{T+1}] | P(Y_{T+1} | (Z_T, X_{T+1})', (U_T, Y_{T+1})')] = X_{T+1} \hat{\beta}_T - \theta_2 \sqrt{\frac{U_T' U_T - (Z_T \hat{\beta}_T)' (Z_T \hat{\beta}_T)}{n-r}} X_{T+1} (Z_T' Z_T)^{-1} X_{T+1}' \quad (10)$$

任意の t 期についても同様に，その期以降の費用（評価値）を次式のように定式化できる．

$$V_t(Z_{t-1}, U_{t-1}) = \min_{\phi_t} [C(\phi_t) - \lambda W_{\theta_2} [e(\phi_t) \exp[Y_t] | P(Y_t | (Z_{t-1}, X_t)', (U_{t-1}, Y_t)')] + \beta \int_{Y_t} P(Y_t | (Z_{t-1}, X_t)', (U_{t-1}, Y_t)') V_{t+1}(Z_t, X_{t+1}(\phi_{t+1}), U_t) dY_t] \quad (11)$$

5．数値計算

自治体が運行実験を2回行う場面を仮定し，ある期の実験で V_t の状態変数の値によってどの路線を引くかを数値計算した．その結果の一例を図1に示す．このように，運行実験においてどの路線を引くかを本モデルによって，導き出すことが可能となった．

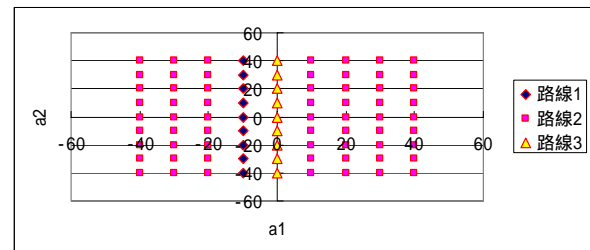


図1 状態変数と路線の関係

6．おわりに

今後は，実験の実施回数，バス停の数，路線の数がさらに多い場合においても，計算できるようにモデルの改良を行う必要があると考えられる．