シナジェティクス理論による集計的経路利用率の動学的予測

○熊本大学大学院　学生員　浦　雅認
熊本大学工学部　正　員　溝上　章志

1. はじめに

近年，経路選択行動を動学的に分析するための様々な方法論が研究されている．しかし，従来の研究では，個人の選択行動と他の集団の行動結果との相互作用を考慮したものはない．各個人は，提供される情報やこれまでの経験などだけでなく，他者の意思決定結果にも影響を受けながら，個々の行動規範の下で日々の経路選択行動を繰り返していると考えられる．本研究では，経路選択に関する室内実験結果をシナジェティクス理論を用いて表現することを試み，その交通現象への適用可能性を検討する．

2. シナジェティクスモデルの援用

本研究では，各個人が他の集団の経路選択状況に影響されながら自身の経路選択行動を行っていくプロセスをシナジェティクスモデルを用いて動学的に表現することを試みる．シナジェティクスモデルは，それぞれ異なる行動をとる個人から構成された集団の状態を表すマクロ指標が，時間的に遷移していく状況を確率微分方程式で表し，その解の動学的性質を解析しようとするものであり，相互作用を持った多数の個人から構成されるシステムのマクロ指標，ここでは経路利用者数の時間的変動を表現することができる．

ここでは，1つのOD間に2本の経路がある場合の日々の各経路の利用者数の動学的変動を解析したい．いま，利用者総数を$2N$人とし，経路1，2の利用者数をそれぞれn_1，n_2人とする．このとき，$n_1 = N + n$，$n_2 = N - n$という1つの変数nによって各経路の利用者数分布は表現できる．各経路の利用者数の変動を表す本質的な量となる個人の代替経路への経路転換確率を，経路1（2）から経路2（1）への経路転換確率$p_{21}(n)$ $(p_{12}(n))$で表すとき，集団としての経路利用者数の遷移確率は，

$$w((n+1) \leftarrow n) \equiv w_{\uparrow}(n) = n_2 p_{12}(n) = (N-n)p_{12}(n)$$
$$w((n-1) \leftarrow n) \equiv w_{\downarrow}(n) = n_1 p_{21}(n) = (N+n)p_{21}(n)$$
$$w(n' \leftarrow n) = 0, \qquad n' \neq n \pm 1$$

となる．ただし，$w(i \leftarrow j)$は状態jから状態iへの集団の遷移確率である．

このとき，時刻tにおいて経路利用者分布がnである確率$P(n;t)$の変化率は次式で表される．

$$\frac{dp(n;t)}{dt} = \left[w_{\downarrow}(n+1)p(n+1;t) - w_{\downarrow}(n)p(n;t)\right] + \left[w_{\uparrow}(n-1)p(n-1;t) - w_{\uparrow}(n)p(n;t)\right]$$

離散変数nを$x = \dfrac{n}{N}$ $(-1 \leq x \leq 1)$なる連続変数で置き換えると，時刻tにおいて経路利用者分布がxである確率$p(x;t)$は，

$$\frac{\partial P(x;t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left[K(x)P(x;t)\right] + \frac{\varepsilon}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[Q(x)P(x;t)\right] \quad (1)$$

の解として表される．ただし，

$$\Delta x = \frac{\Delta n}{N} = \frac{1}{N} \equiv \varepsilon$$
$$K(x) = W_{\uparrow}(x) - W_{\downarrow}(x), \qquad Q(x) = W_{\uparrow}(x) + W_{\downarrow}(x)$$
$$w_{\uparrow}(n) = N(1-x)p_{12}(Nx) = NW_{\uparrow}(x)$$
$$w_{\downarrow}(n) = N(1+x)p_{21}(Nx) = NW_{\downarrow}(x)$$

である．この確率微分方程式を何らかの数値解法で解くことによって，時刻tにおける集団的経路利用者数分布が得られる．

3. 実験の概要と個人の経路転換確率モデルの推定

（1） 使用データ

本モデルが日々の集計的経路利用者数を再現できるかどうかの検証を行うため，通勤通学における経路選択を想定した室内経路選択実験A，Bのデータを使用して検証を試みる．実験で設定した経路は表－1に示す特性を持った単一のOD間における2本の平行な経路である．この実験では，全31ステップのうち前半の10ステップまでは情報提供を与えずに，11ステップ以降に情報提供を行っている．また，実験Aでは情報の普及率を45%，実験Bでは60%として，情報利用率に差を与えている．（表－2参照）

表－1　経路特性

	経路長	自由走行時間	車線数	交通容量
経路1	20 km	20分	往復4車線	4000台／h
経路2	15 km	15分	往復2車線	2800台／h

表－2 実験ケースと提供情報

実験ケース	被験者数	情報の普及率	提供情報	
			前半 10 ステップ	後半 21 ステップ
実験 A	82 名	45%	情報提供なし	所要時間の数値情報
実験 B	78 名	60%	情報提供なし	所要時間の数値情報

(2) 個人の経路転換確率モデルの推定

A, B の実験データより，個人の代替経路への経路転換確率モデルを推定した結果が表－3 である．これを式 (1) に代入し，Runge-Kutta 法により解を求めた．

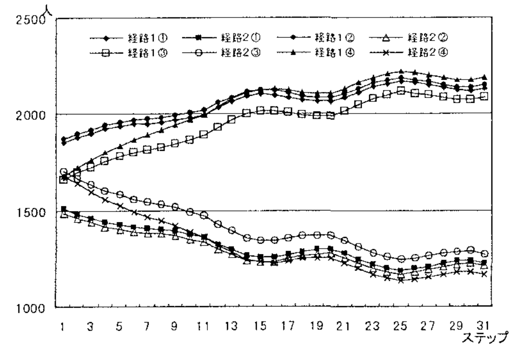
表－3 個人の遷移確率モデル(実験 A)

	p_{21} (t 値)	p_{12} (t 値)
定数項	2.863(4.08)	3.410(4.04)
経路 1 の提供情報	0.0656(0.44)	-0.2883(-1.89)
経路 2 の提供情報	-0.2471(-2.56)	-0.01477(-0.14)
前回の利用経路の提供情報誤差	0.1816(6.52)	0.1133(5.42)
経路 2 の選択者数	0.00658(2.74)	0.001322(4.50)
ρ^2	0.245	0.0981

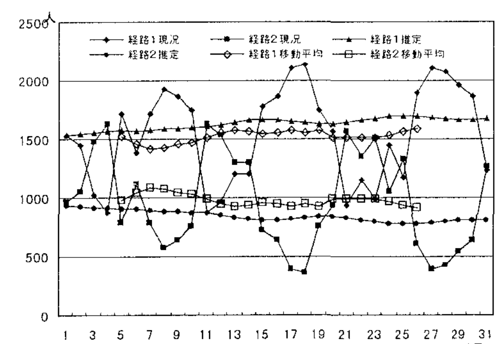
4. 集計的経路利用率の動学的挙動

図－1 は，初期分布確率を，①実験による 1 ステップ選択者数の分布を 1.0，②①の初期分布の周りに正規分布，③経路 1,2 の選択者数が等しくなる分布の周りに正規分布，④一様分布と仮定した場合について，実験 B のモデルによる経路利用者数の時間的変動を比較したものである．①と②はほぼ同じ変動を行う．③と④は 2 ステップ以降，④による経路 1 の利用率の方が高くなり，15 ステップ以降①，②の場合を上回る利用者数分布となった．全体的に見ると，①～④による初期分布確率の違いに関わらず，情報提供を開始する 11 ステップ以降からは同じような変動を行い，ある値に収束していく様子が確認された．

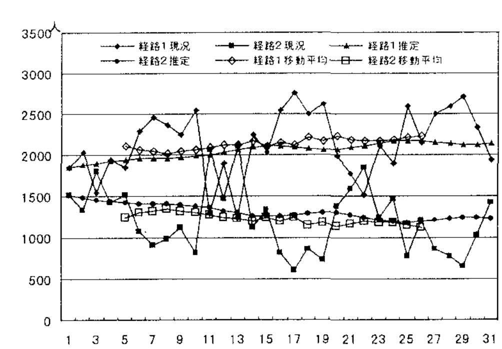
図－2，3 は，それぞれ実験 A，B について経路利用者数の実績値とそれを移動平均法により平滑したもの，および初期分布確率 $p(x;0)$ を前述の①とした本モデルによる推定値を両経路について示したものである．経路利用者数の実績値は，sin カーブで設定された情報に依存しない経路利用者数による周期的な変動にあわせて推移をしているのに対して，モデルによる再現値そのものは実績値をうまく再現しているとは言い難い．しかし，移動平均法により平滑化したものと比較すると実験 B は実績値の傾向変動をうまく再現している．実験 A については，実験 B に比べて両者にやや乖離はあるものの傾向変動は捉えている．このことから，本モデルにより経路利用者数の時間変動の傾向を把握できることが検証できた．



図－1 初期分布確率の違いによる比較



図－2 実験 A 経路利用率予測結果



図－3 実験 B 経路利用率予測結果

5. おわりに

本研究では，シナジェティクス理論を援用した経路利用者数予測モデルにより経路利用率の時間的変動の傾向変動を把握できることを検証した．