混雑と流行を考慮した次世代交通手段の普及シミュレーション*

Simulation Analysis for the Popularization Process of Next-Generation Travel Mode with Congestion and Mutual Interaction of Users *

山辺数磨**・井料隆雅***・朝倉康夫****

By Kazuma YAMABE**・Takamasa IRYO***・Yasuo ASAKURA****

1．はじめに

自動車の利便性の高さは言うまでもないが，同時に自動車は交通事故や環境問題など負の副生成物も生む．これら自動車による社会的コストを削減するための方策は多く提案されているが，自動車を代替する新たな交通手段である「次世代交通手段」を導入するのも方法のひとつである．ただ，次世代交通手段は次世代であるがゆえに，普及させるためにはそれなりの施策が必要だろう．

本研究では，次世代交通手段の普及可能性を簡単な交通手段選択問題を用いて分析することを行う．この交通手段選択問題では，「ある個人は何かの意思決定を行う際，自らの選好のみならず他人の選択結果に影響を受け，意思決定を行っていること」を仮定する．この現象を「流行」と呼ぶこととするが，本研究ではこの「流行」と交通特有の現象である混雑の二種類の主体間相互作用を考慮し，次世代交通手段の普及に関するシミュレーションを行う．そしてその結果を分析することで，普及に向けた有効な施策の提案を行うことを目的とする．

他人の選択結果が個人の選択行動に影響を与えるような主体間相互作用を考慮した交通行動分析に関する既存研究には福田ら[1)]の行ったものがある．福田らはこの主体間相互作用を個人と社会全体との社会的相互作用と定義することで効用を定式化した．そしてこれを解析的に解くことで均衡解が複数存在すること，およびその均衡解のもつ性質を明らかにし，均衡点をシフトさせるような政策の可能性について言及している．しかしながらここでは静的に均衡点を求めているため，どの初期状態から始めるとどの均衡点に収束しやすのか，あるいは収束した均衡解が安定的なのかなどの議論は成されていない．そこで本研究では「流行」という相互作用ネットワークを考慮した局所的な主体間相互作用存在下での交通手段選択問題のDay-to-day モデルを作成し，その挙動特性について分析を行うこととする．この Day-to-day モデルでは繰り返し計算によりある初期状態から均衡解に収束していく過程を見ることができるため，均衡解の安定性，およびその初期値依存性なども議論することが可能である．ここでは２章でこの Day-to-day モデルの定式化を行い，３章でマルコフ連鎖およびゲーム理論の枠組みを用いてその Day-to-day モデルの挙動特性について解析的な知見を示す．４章でシミュレーション結果を示すとともに，３章での解析的知見と比較する．

*キーワーズ：ゲーム理論，day-to-dayモデル，次世代交通手段

**学生員，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻
（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1，TEL/FAX078-803-6360）
***正会員，博士(工学)，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻
****正会員，工博，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

2．交通手段選択行動のDay-to-dayモデル

（1）モデルの定式化

次世代交通手段を交通手段 A，既存の交通手段を交通手段Ｂとする．ここで次世代交通手段には既存の交通手段に対して有利性（料金が安い，所要時間が短い，など）があると仮定し，次世代交通手段にのみ混雑現象が発生することとする．N 人の主体がこれらの交通手段のうちいずれか一方を選択するとする．

本研究では「流行」現象を「ある主体$i=\{1,\ldots,N\}$は別の主体 $j \neq i$ の行動選択結果に影響を受ける」ことと定式化する．具体的にどの主体がどの主体から影響を受けるかは，主体間で構築された人間関係等のネットワークに依存して決定する．本研究ではこれを表現するために「相互作用ネットワーク」を考える．相互作用ネットワークの構造は，主体i に影響を与える主体の集合N_iをすべての主体について特定することにより記述される．

主体i の交通手段 A の選択に対する効用F_A^iと交通手段 B の選択に対する効用F_B^iは，それぞれ以下のように定義される．

$$F_A^i = -c\sum_{i=1}^{N} x_A^i + J\sum_{j\in N_i}(x_A^j - x_B^j) + \Delta T \tag{1}$$

$$F_B^i = -J\sum_{j\in N_i}(x_A^j - x_B^i) \tag{2}$$

ベクトル$\mathbf{x}_i = (x_A^i, x_B^i)$は主体$i$ がどちらの交通手段を選択しているかを示し，$\mathbf{x}_i = (1,0)$で交通手段 A の選択，$\mathbf{x}_i = (0,1)$で交通手段Ｂの選択を表す．式(1)の第２項および式(2)は，主体i が相互作用ネットワークによって

主体jから受ける影響を示している．この効用は，主体iに影響を与える他の主体のうち，「自身と同一の選択をしている主体の人数」から「自身と異なる選択をしている主体の人数」を引いたものに比例して大きくなる．すなわち，各主体は自身に影響を与える他の主体が自身と同一の選択をしていることをより好む，とする．混雑は利用者数に比例し，その係数をcで示す．Jは主体間相互作用に対する係数，ΔTは交通機関 A の交通機関 B に対する有利性を表す定数である．

（２）Day-to-day モデルの概要

Day-to-day モデルを以下のように定める．

１）ある日τにおいて行動を変化させる主体iをランダムに一人だけ選択する．

２）i以外の主体の行動を不変とし，交通手段 A または B をiが選択した際の効用を式(1),(2)から計算する．

３）主体iが交通手段 A をτ日目に選択する確率$p_i(\tau)$を

$$p_i(\tau)=\frac{\exp(F_A^i)}{\exp(F_A^i)+\exp(F_B^i)} \tag{3}$$

と定める．

４）３）で定めた選択確率で主体iは交通手段を確率的に決定する．

５）$\tau \leftarrow \tau+1$として１）に戻る．

この繰り返し計算課程はPerturbed Best Response と呼ばれ[2]，その過程において各主体の選択確率が安定した状態を Perturbed Equilibrium(PE)と呼ぶ．これはゲーム理論におけるナッシュ均衡とほぼ同じ意味をもつ．

３．Day-to-day モデルに対する解析的知見

（１）マルコフ連鎖による解析

どの主体の行動も他の全ての主体の行動に対して影響を及ぼす，つまり$N_i=\{1,\ldots,N\}-\{i\}$が成立する場合を考える．このときは，x_Aを交通手段 A を選択する人数とすることにより，x_Aが実現する確率$\pi(x_A)$の定常分布を解析的に求めることが可能である．

上記のN_iの定義を用いると式(1)(2)は以下のように書き換えられる．

$$F_A^i=-cx_A+J\sum_{j=1}^{N}(x_A^j-x_B^j)-J+\Delta T \tag{4}$$

$$F_B^i=-J\sum_{j=1}^{N}(x_A^j-x_B^j)-J \tag{5}$$

さらにx_Aを用いると，

$$F_A^i=-cx_A+J(2x_A-N)-J+\Delta T \tag{6}$$

$$F_B^i=-J(2x_A-N)-J \tag{7}$$

と書きなおせる．整理して，

$$F_A(x_A)=-cx_A+2Jx_A-J(N+1)+\Delta T \tag{8}$$

$$F_B(x_A)=-2Jx_A+J(N-1) \tag{9}$$

を得る．なお式(8)(9)の右辺はiに依存しないので左辺からもiは略した．Perturbed Best Response を想定し，τ日目における交通手段 A の選択者を$x_A(\tau)$とすると，ある主体が$\tau+1$日目に交通手段 A を選択する確率pは，

$$p=\frac{\exp(F_A(x_A(\tau+1)))}{\exp(F_A(x_A(\tau+1)))+\exp(F_B(x_A(\tau+1)))} \tag{10}$$

となる．また，τ日目から$\tau+1$日目にかけて行動選択を行う主体がτ日目において交通手段Aを選択している確率はx_A/Nである．よって，τ日目から$\tau+1$日目にかけて交通手段 A の選択者が１人増える確率$p_+(x_A)$は，

$$p_+(x_A)=\left(1-\frac{x_A}{N}\right)\frac{\exp(F_A(x_A+1))}{\exp(F_A(x_A+1))+\exp(F_B(x_A))} \tag{11}$$

同じく交通手段Aの選択者が１人減る確率$p_-(x_A)$は

$$p_-(x_A)=\left(\frac{x_A}{N}\right)\frac{\exp(F_B(x_A-1))}{\exp(F_A(x_A))+\exp(F_B(x_A-1))} \tag{12}$$

となる．ただし$x_A=x_A(\tau)$である．Day-to-day モデルをマルコフ連鎖と見立てれば，定常分布と遷移確率の関係式を考慮することにより，

$$\begin{aligned}\pi(x_A)&=(1-p_+(x_A)-p_-(x_A))\pi(x_A)\\&\quad+p_+(x_A-1)\pi(x_A-1)+p_-(x_A+1)\pi(x_A+1)\end{aligned} \tag{13}$$

が$0<\forall x_A<N$で成立することがわかる．(13)より

$$\begin{aligned}&\pi(x_A)p_+(x_A)+\pi(x_A)p_-(x_A)\\&=p_+(x_A-1)\pi(x_A-1)+p_-(x_A+1)\pi(x_A+1)\end{aligned} \tag{14}$$

を得る．$x_A=0$での定常分布と遷移確率の関係式は

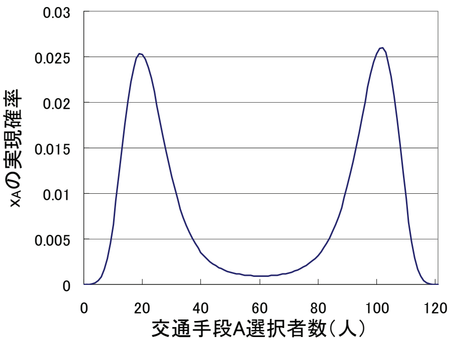
$$\pi(0)=(1-p_+(0))\pi(0)+\pi(1)p_-(1) \tag{15}$$

である．式(15)を(14)に適用し，漸化式的に反復すると

$$\pi(x_A)p_+(x_A)=\pi(x_A+1)p_-(x_A+1) \tag{16}$$

を$0\le\forall x_A<N$で得る．式(11)(12)を式(16)に代入して，

$$\begin{aligned}\frac{\pi(x_A+1)}{\pi(x_A)}&=\frac{\left(1-\frac{x_A}{N}\right)\frac{\exp(F_A(x_A+1))}{\exp(F_A(x_A+1))+\exp(F_B(x_A))}}{\left(\frac{x_A}{N}\right)\frac{\exp(F_B(x_A))}{\exp(F_A(x_A+1))+\exp(F_B(x_A))}}\\&=\frac{N-x_A}{x_A+1}\exp((4J-c)x_A-c+2J-2JN+\Delta T)\end{aligned} \tag{17}$$



図−1　$\pi(x_A)$の定常分布

を得る．よって$\pi(0)$を適当に設定して漸化式(16)を用いて$\pi(x_A)$を計算し，合計が 1 になるように$\pi(0)$を調整すれば解析解を求めることが可能である．図−1 は $N=121$，$J=1.0\times10^{-2}$，$c=1.0\times10^{-4}$，$\Delta T=1.25\times10^{-2}$ として計算した$\pi(x_A)$の定常分布を示したものである．図−1 より，この設定においては確率のピークが２つ存在することがわかる．マルコフ連鎖の定常分布にピークが存在する場合，一方のピークに状態が行くと，もう一方のピークに状態がいく可能性は一般に低くなる．このことは，今回考えている交通手段選択問題では，実際に多くの人が選択する交通機関は，普及前の初期状態に依存しやすいことを示している．

（２）Population Game

Population Game とは主体の数Nが非常に大きく，各戦略をとるプレイヤー数を連続値で示せるとしたゲームである．これは連続近似の一種であり，一般に数学的なとりあつかいは容易になる．本研究でも交通手段選択問題をPopulation Game として再定義することにより，Day-to-day モデルの挙動を解析的に知ることを試みる．本研究では，主体数Nは有限のままとりあつかうとし，各主体の交通手段選択ベクトル$\mathbf{x}_i=(x_A^i,x_B^i)$が連続値をとれるとする．これは「１ヶ月のうち何日程度交通機関 A を使用するかの割合」などを示していると考えればよいであろう．各主体はこの割合を，日がたつにつれ，周囲の状況にあわせてすこしずつ調整していく，と考える．このような考え方により，式(1)(2)の効用関数をそのまま利用することができる．

Population Game では，Perturbed Best Response による収束性が，Potential Game および Irreducible Supermodular Game について示されている[2]．

a)　Potential Game

Potential Game では，効用関数は

$$\frac{\partial F_A^i}{\partial x_B^j}=\frac{\partial F_B^j}{\partial x_A^i} \qquad (18)$$

の関係式を満たす．今回の問題では，式(1) および(2)より，

$$\frac{\partial F_A^i}{\partial x_B^j}=-J\sigma_{ij} \quad \sigma_{ij}=\begin{cases}0 & if \quad j\notin N_i\\ 1 & if \quad j\in N_i\end{cases} \qquad (19)$$

$$\frac{\partial F_B^j}{\partial x_A^i}=-J\sigma_{ji} \quad \sigma_{ji}=\begin{cases}0 & if \quad i\notin N_j\\ 1 & if \quad i\in N_j\end{cases} \qquad (20)$$

と書けるので，式(18)を成立させるには$\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$である必要がある．これは，相互作用ネットワークのどの関係も「双方向」であることと対応する．Potential Game では，Perturbed Best Response によって状態が PE へ収束することが知られているため，結果として「相互作用ネットワークにおけるどの主体間の関係も双方向性があれば，Perturbed Best Response によって状態が PE へ収束する」ことがわかる．

b)　Irreducible Supermodular Game

Supermodular Game では，効用関数は

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_A^j}-\frac{\partial}{\partial x_B^j}\right)(F_A^i-F_B^i)\ge 0 \qquad (21)$$

を満たす．また Irreducible であるためには，$\forall i$ に対して式(18)の等号が成立しない（=左辺が正になる）j が少なくともひとつは存在することが必要である．式(1)(2)を式(18)に代入することにより，

$$-c+4J\sigma_{ij}\ge 0 \qquad (22)$$

を得る．すなわち，任意のiに対して式(22)を成立させるには$c=0$である必要があり，さらに Irreducible であるためには，どの主体も，少なくとも１人以上の別の主体から影響を受けている必要がある（これは，他人から影響を全く受けない主体がいないことを意味する）．Irreducible Supermodular Game でも，Perturbed Best Response によって状態が PE へ収束することが知られているため，結果として「混雑が存在せず，他人から影響を全く受けない主体がいなければ，Perturbed Best Response によって状態が PE へ収束する」ことがわかる．

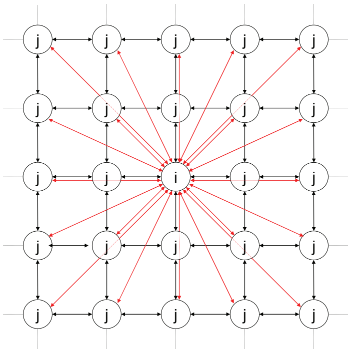
４．シミュレーション結果およびその考察

異なる相互作用ネットワークの形状と混雑の有無の組み合わせにより３つのケースを列挙し，各ケースで Day-to-day モデルをシミュレーションした．各ケースにおけるパラメータ等の設定値は表−１のとおりである．表−１における Network とは相互作用ネットワークの形状を表す．本研究では，121 人の主体が，11×11 の格子状に組まれた双方向の結合と，格子の中央の主体iから放射状に広がる単方向か双方向の結合の２種の結合で結ばれる相互作用ネットワークを考える．この際，iと

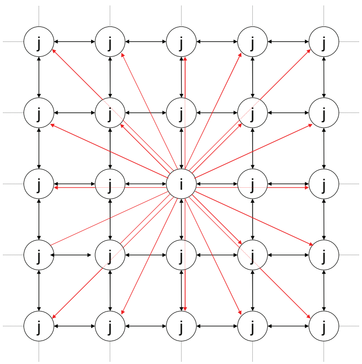
表－１　ケースごとの設定値

	c	J	ΔT	Network
case1	0.12	60	3.85	非対称
case2	0.12	60	3.85	対称
case3	0	60	0	非対称

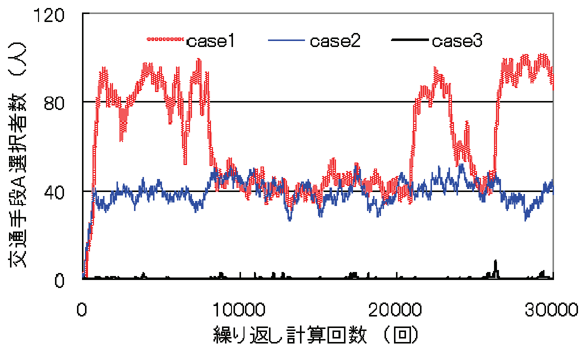
i 以外の全主体との繋がりが双方向の場合を対称と呼び，片方向（i は i 以外の全ての主体の交通手段決定に影響を与えるが，i は隣接する４名のみからしか影響を受けない）を非対称と呼ぶこととする．これら対称，非対称の概念図はそれぞれ図－２，図－３のとおりである．



図－２　対称な相互作用ネットワークの概念図（実際の格子は 11×11=121 人）



図－３　非対称な相互作用ネットワークの概念図（実際の格子は 11×11=121 人）



図－４　LSPTM 選択者数の Day-to-day 変化

シミュレーションの結果を図－４に示す．図－４より，ケース 2,3 ではある程度の揺らぎは存在するものの，交通手段 A の利用者数は総じて安定していることが確認でき，その一方でケース１は二箇所の安定する利用者数が存在し，その二値を行き来するような挙動が確認できる．つまりある PE から別の PE への遷移する確率が存在するということである．

ここで 3 章での解析的知見とシミュレーション結果を比較する．するとケース 2 は Potential Game，ケース 3 は Irreducible Supermodular Game とみなすことができる．これらのゲームでは Population Game の近似下で PE への収束性が理論的に保障されていたが，今回のシミュレーション結果より主体の数が有限であっても概ねこの解析的知見が成立することが言えよう．

５．おわりに

本研究では主体間相互作用を考慮した交通手段選択問題の Day-to-day モデルを定式化し，そのモデルの挙動特性について分析を行った．今回の分析により主体間の相互作用ネットワークおよびパラメータの値がある特定の条件を満たせばケース 2，3 のように次世代交通手段に対する需要がある均衡解に概ね収束することがわかった．これは逆に言えば，ケース１のような二つの均衡解を行き来するような挙動は，ネットワークの非対称性と混雑現象が同時に成立することに起因していると言える．

以上のことを踏まえれば，ケース 2，3 のような条件が想定される場合，次世代交通手段導入初期段階での積極的なプロモーション活動が普及を目指すには重要であることが言える．具体的にはまず導入初期段階で料金割引などを積極的に行い，利用者数の最も多い均衡解の実現を目指す．そしてその均衡解にある程度収束が確認されれば，サービス水準を正常にもどす．すると理論上，需要は減少せず維持され続けることが言える．しかしながら広告などに代表されるように現実の主体間の相互作用ネットワークは非対称であると考えられ，混雑現象の存在もこの問題が交通問題である以上否定できない．よって実際の普及問題では，ケース１のような二つの均衡解のあいだの間欠的な遷移を行う不安定な挙動，すなわち「流行のはやりすたり」という解釈もできるような現象を示すこともありうるのではないかといえよう．

参考文献

１）福田大輔，上野博義，森地茂：社会的相互作用存在下での交通行動とミクロ計量分析，土木学会論文集，No.765，IV-64，pp.49-69，2004

２）Josef Hofbauer, William H. Sandholm：Evolution in Games with Randomly Disturbed Payoffs, Journal of Economic Theory, 132, pp.47-69, 2007