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．

次世代交通手段は「次世代」であるがゆえに，既存の交通手段と同様の使われ方が想定されるとは限らない．たとえば，次世代交通手段の車両は無人走行できるので好きなところで呼び出しができ，なおかつ，多数で同時に使用すると１人あたりの費用が低くなる（さらに，何人で同時に使用するかはその場で自由に設定できる）等の既存の交通機関では想定できない特性をもつこともあるかもしれない．

次世代交通手段の持ちうる新しい特性は，交通システムそのものにとどまらず人々の生活パターンを大きく変化させる可能性も大いにあるといえよう．このことは，交通手段選択問題を考えるときに，「混雑」や「旅行時間」など交通手段に直結する要因だけでなく，その交通手段と結びついた生活パターンそのものに対する選好も考慮する必要があることを示唆している．

生活パターンへの選好を考える際には，個々人の「独立した選好」という要因に加え，「他人がどのような生活パターンを選択しているか」という，他人の選択結果に依存する要因を考慮する必要があろう．通常，人々の生活は他人となんらかの形で関係することにより成立している．他人と同じ生活パターンをとることは，人々にとって相応の効用があると考えられよう．たとえば，多くの居住者が自家用車に依存する生活パターンをある地域でとっているときに，新しい居住者がそこでの生活パターンを既存居住者から聞くなどして学習する場合，結果として既存居住者と同様に自家用車の利用をより選ぶようになるだろう．一般に，「ある個人は何ら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」という主体間の相互作用は Social Interactions（社会的相互作用）と呼ばれる[1]．あるいは，より簡単な言葉を用いれば，この現象を「流行」と呼ぶこともできよう．

社会的相互作用（あるいは流行）を考慮した選択行動分析の既存研究には Block and Durlauf[2]が行ったものがある．この研究では，社会的相互作用を含む（一方で，混雑現象は含まない）行動選択問題を均衡配分問題の一種として定式化し，パラメータの値に依存して複数の均衡解が存在しうることを示している．そして，これら複数の均衡解に対して簡単な Day-to-day モデルを仮定して動的な解析を行い，どの均衡解が実現するのかは初期値に依存することと，安定な均衡解と不安定な均衡解の存在を明らかにしている．福田ら[3]はこれらの知見を利用し違法駐輪行動を例にとって均衡点をシフトさせるような施策の可能性について実証的解析を行っている．

上で紹介した既存研究では，社会的相互作用を「個人が属する準拠集団の平均的行動」とみなす「グローバルインタラクションモデル」を用いて表現している．いっぽう，特定個人間の社会的相互作用を明示的に記述する「ローカルインタラクションモデル」という考え方も指摘されている[4]．グローバルインタラクションの構造は物理学でよく言われる平均場近似と同様である．物理学の分野では平均場近似は相互作用を記述するもっとも基本的な近似法として知られており，数学的取り扱いは比較的容易である．いっぽう，ローカルインタラクションモデルにおける社会的相互作用の構造は多様である．特に着目すべきことは，グローバルインタラクションモデルでは相互作用に双方向性があるが，ローカルインタラクションモデルではそう仮定することができないことである．主体どうしのミクロな相互作用を見たとき，その方向性は多くの要因（たとえば各主体が周囲に及ぼす社会的影響力の大小など）に影響されうる．たとえば，ある主体Ａは別の主体Ｂ，およびそれ以外の多くの人々に

*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，
E-mail ：081t151t@stu.kobe-u.ac.jp）
***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

影響を与える一方で，主体Bは誰にも影響を与えることがないということもあるかもしれない．このような，相互作用に一方向性が存在することがシステム全体のマクロ的な挙動にどのような影響をおよぼすか（特に，グローバルインタラクションとの差異がどのようになるのか）を知るためには，社会的相互作用のネットワーク構造をモデル中で明示的に記述する必要がある．

本研究では，「流行」と「混雑」の存在下で次世代交通手段がどのような形で普及するか，その大局的な様相をモデルにより分析し，それによって次世代交通手段の普及に向けた施策立案のための知見を提供することを目的とする．特に，既述の既存研究では扱われていない「ローカルインタラクションモデル」の導入の影響，また，社会的相互作用に加え「混雑」を同時に考慮した場合の影響を分析する．分析の際には交通手段選択問題のDay-to-dayモデルを構築し，均衡解の安定性・初期値依存性だけでなく，「そもそも安定な均衡解が存在するのかどうか，また，存在しない場合の挙動はどうなるか」ということにも着目した分析することを行う．これらの分析で知られた結果とグローバルインタラクションモデルを用いた既存研究の知見とを比較し，既存研究で提供された知見を確認し，さらに本研究で加えた要素から得られる知見を提供する．本論文は下記の構成からなる．２章で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章では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の比較と既存研究の知見との比較を行う．

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．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．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）があるいっぽうで混雑現象が発生することとする．そして既存手段には有利性も混雑も存在しないとする．ここで次世代交通手段にのみ混雑現象が発生することとしたのは，次世代交通手段は個人所有ではなく共同利用の形態をとることを想定しているということと，（特に導入段階で）供給不足が発生しやすいと考えているからである．次世代交通手段が自動車とまったく異なる交通手段であると考えるのであれば，このような仮定には一定の意味があるといえよう．

本研究では「流行」現象を「ある主体$i=\{1,\ldots,N\}$は別の主体$j\neq i$の選択結果の影響を受けうる」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 の選択に対する確定効用F_A^iと交通手段Bの選択に対する確定効用F_B^iは，それぞれ

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

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

と定義される．ここでベクトル$\mathbf{x}_i=(x_A^i, x_B^i)$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 1 項は交通手段 A の利用者数に比例し，その係数がcとなる混雑現象を表す．式(1)の第 2 項および式(2)は流行現象を表し，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」を引いたものに係数Jで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． 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）iが交通手段Aをτ日目に選択する確率$p_i(\tau)$を

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

とロジット型の式により定める．これは，式(1)(2)の確定効用項にガンベル分布を持つ確率項を加えることと同等である．

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進化ゲームの分野では Perturbed Best Response と呼ばれる[5]．また，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．これはナッシュ均衡と（式(3)で示されるロジット型の選択確率によるずれを別にすれば）ほぼ同じ状態である．

なお，F_A^i，F_B^iの定義式（式(1)(2)）を見ると，係数cとJが「主体1人あたり」の値として定義されているため，F_A^i，F_B^iの大きさは全主体数Nに依存することに注意したい．もちろんc，JをNで割った値を係数とすればこの問題は解決できる．しかし，本研究ではネットワーク構造を明示的に扱うことを後に行うが，その際に隣接する主体数がNによらない値になるので，これらの係数をNであらかじめ除しておくと後で不都合が生じる．よって，ここでもc，Jを「1人あたり」の値をとして定式化している．

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

本研究での Day-to-day モデルはマルコフ連鎖と見ることができるため，その定常分布を知ることはモデルの挙動を知るために重要である．相互作用ネットワークが一般的な構造を持つときに定常分析を解析的に解くことは難しい．しかし，相互作用ネットワークが完全ネットワークである場合，Haken[6]が示したイジング・モデルのアナロジーによる世論形成モデルの解法に混雑を示す項を追加することにより解析的に解ける．

いま，x_Aを交通手段Aを選択する人数とし，x_Aが実現する確率の定常分布を$\pi(x_A)$とする．相互作用ネットワークが完全ネットワークであることは，$N_i = \{1,\ldots,N\} - \{i\}$と書くことができるので，これを用いて，式(1)(2)を以下のように書き換える．

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

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

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．以上の遷移確率を用いて記述されるマスター方程式に定常分布$\pi(x_A)$を代入することにより，

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

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

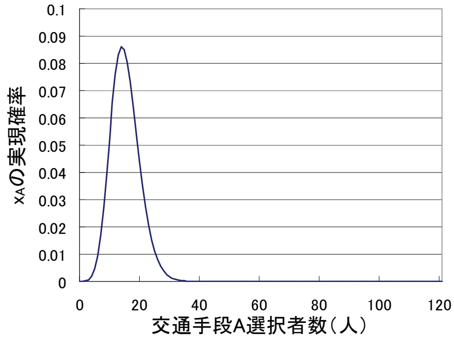
$$\pi(x_A)p_+(x_A) = \pi(x_A+1)p_-(x_A+1) \tag{16}$$

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

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

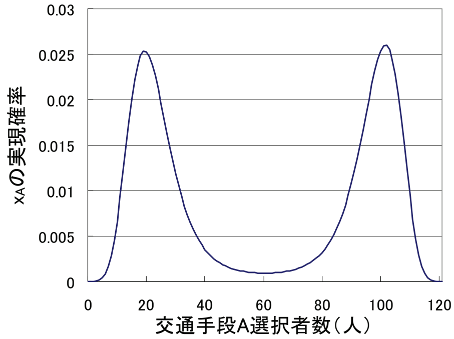
を得る．よって$\pi(0)$を適当に設定して漸化式(17)を用いて$\pi(x_A)$を計算し，合計が1になるように$\pi(0)$を調整すれば解析解を求めることが可能である．

$\pi(x_A)$の定常分布の計算例として$N=121$，$\Delta T = 1.25\times10^{-2}$とし，$J = 1.0\times10^{-2}$，$c = 1.0\times10^{-2}$としたものを図－１に，$J = 1.0\times10^{-2}$，$c = 1.0\times10^{-4}$としたものを図―２に示す．図―１は混雑による主体間相互



図－１　$\pi(x_A)$の定常分布

（$J=1.0\times10^{-2}$，$c=1.0\times10^{-2}$）



図－２　$\pi(x_A)$の定常分布

（$J=1.0\times10^{-2}$，$c=1.0\times10^{-4}$）

作用が流行のそれよりも卓越した状況を表すが，この場合，マルコフ連鎖の定常分布にピークは１つしか出ていない．これは混雑のみを主体間相互作用として考慮する一般の均衡配分問題の結果と同様である．いっぽう図－２は流行の主体間相互作用が主体の手段選択にある程度影響をもつようになった状況を表すが，この場合その分布にピークが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複数存在する場合，一方のピークに状態が行くと，確率の低い状態を経由してもう一方のピークに状態がいく可能性は低くなる．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「交通機関の利用頻度」などを示していると考えればよいであろう．各主体はこの利用頻度を，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[5]．

a)　Potential Game

Potential Game では，効用関数は

$$\frac{\partial F_A^i}{\partial x_B^j}=\frac{\partial F_B^j}{\partial x_A^i} \tag{18}$$

の関係式を満たす．今回の問題では，式(1) および(2)より，

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

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

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

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

を満たす．また Irreducible であるためには，$\forall i$に対して式(21)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(21)に代入することにより，

$$-c+4J\sigma_{ij}\geq 0 \tag{22}$$

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$c=0$であるか，あるいは相互作用ネットワークが完全ネットワークになる（=全員が双方向に結合している）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

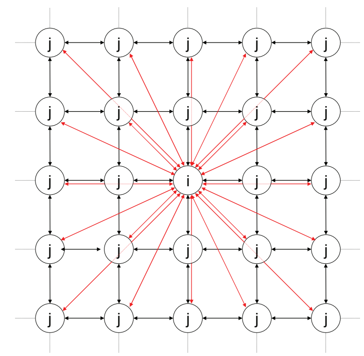
異なる相互作用ネットワークの形状と混雑の有無の組み合わせにより３つのケースを列挙し，各ケースについて２章（２）で定義した Day-to-day モデルをシミュレーションした．各ケースにおける設定を表－１に示す．表－１における Network とは相互作用ネットワークの形状を表す．相互作用ネットワークの具体的形状が一般的にどのようなものであるかを知ることは困難であるため，本研究では，例として，121 人の主体が，11×11 の格子状に組まれた双方向の結合と，格子の中央の主体iから放射状に広がる単方向か双方向の結合の２種の結合で結ばれる相互作用ネットワークを分析対象とした．この際，i とi 以外の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，非対称の概念図をそれぞれ図－３，図－４に示す．

シミュレーションの結果を図－５に示す．図－５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することが確認でき，その一方でケース１は２箇所の安定する利用者数が存在し，その２値を行き来するような挙動が確認できる．

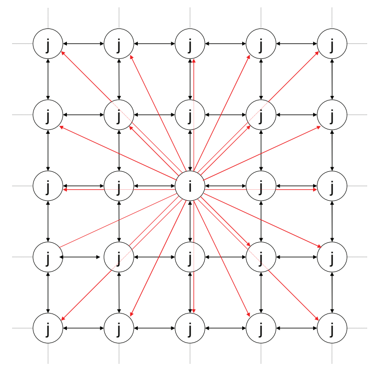
３章での解析的知見とシミュレーション結果を比較すると，ケース 2 は Potential Game，ケース 3 は Irreducible Supermodular Game とみなすことができることがわかる．これらのゲームでは Population Game の近似下で PE への収束性が理論的に保障されていたが，今回のシミュレーション結果より主体の数が有限であっても概ねこの解析的知見が成立することが言えよう．このことを仮定すると，パラメータc，J，ΔT と挙動の関係性についての考察が行える．まずΔT が挙動に与える影響について考察する．Brock and Durlauf[2] は複数の均衡解が存在する場合，どの均衡解に挙動が収束するのかは初期値に依存することを明らかにした．ΔT はその値を増減させることで初期状態（全ての主体が既存の交通手段である交通手段 B を利用している状態）における主体の交通手段 A の選択確率を増減させることができる．よって ΔT は複数の均衡解が存在するもとで，どの均衡解に挙動が収束するのかを決定する要素になっていると考えられる．次にc とJ の大小関係が挙動に与える影響について述べる．例えば$c \gg J$ であれば，混雑の主体間相互作用が主体の行動選択に対して支配的な影響力をもつ．この研究では混雑を完全ネットワークで記述しているため，Population Game 下における Potential Game の解析的知見が適応できる．よってこの場合，均衡解への収束は保証されるであろう．いっぽう$J \gg c$ であれば，流行の主体間相互作用が主体の行動選択に対して支配的な影響力をもつ．言い換えると混雑の主体間相互作用は流行のものに比べるとその影響力が無視できるほど小さいと言える．この場合 Population Game 下における Irreducible Supermodular Game の解析的知見が適応できるため，こちらも均衡解への収束は保証されるだろう．つまりこの研究では２種類の主体間相互作用を想定しており，c，J の大小関係によってどちらの相互作用のネットワーク構造から得られる解析的知見が挙動に対して有効になるのかが決定すると考える．さらにこのことからケース１に見られる不安定な挙動は混雑と流行の影響力が同程度になるようにc とJ を設定され，かつ流行の相互作用ネットワークの構造が非対称である場合に生じているといえるだろう．

表－１　ケースごとの設定値

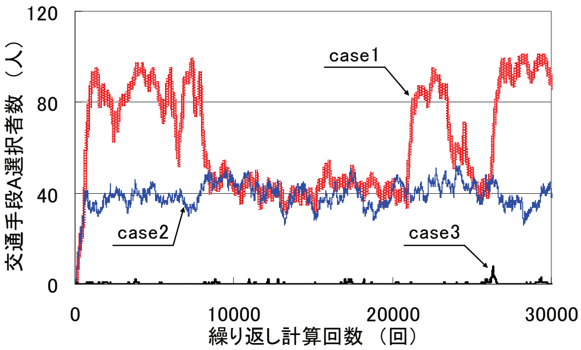
	c	J	ΔT	Network
case1	0.12	0.66	3.85	非対称
case2	0.12	0.66	3.85	対称
case3	0	0.66	0	非対称



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　交通手段Ａ選択者数の Day-to-day 変化

５．まとめと今後の課題

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，相互作用ネットワークが対称か，混雑の影響が社会的相互作用に比べて相対的に少ない場合（第４節ケース 2，3 に相当），次世代交通手段に対する需要がひとつの均衡解に概ね収束することがわかった．いっぽう，ネットワークの非対称性と混雑現象が同時に成立する場合（ケース 1）には，2 つの状態を行き来するような挙動がみられた．

以上の結果は，相互作用ネットワークが対称（なおかつ社会的相互作用が混雑と同等以上存在）な場合と，混雑の影響が社会的相互作用に比べて相対的に少ない場合には，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．たとえば，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，という方策である．この方策自体は混雑を明示的に考慮しない既存の研究成果から導かれるものと同一である．本研究の結果は，混雑が存在する場合であっても，相互作用ネットワークが対称であればこの方策がそのまま適用できることを示している．いっぽう，混雑の影響が社会的相互作用による影響を卓越するケースであれば，たとえば図－１のように混雑がバランスする均衡解に収束する．これは通常の混雑のみを考慮した均衡配分の結果と同様である．もちろん，このような場合は上述のような導入時の施策は無効である．

いっぽう，混雑と流行の二つの社会的相互作用が人々の選択行動に同程度の影響力をもつような状況においては，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ことが本研究の結果（ケース 1）から示唆された．また，このような不安定な結果が出るには，少なくとも相互作用ネットワークに非対称性があることが必要なこともわかった．相互作用ネットワークの形状が現実にどのようになっているか知ることは簡単ではないが，すくなくとも，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には何らかの非対称が存在すると考えられる．このことは，混雑と流行の二つの主体間相互作用が拮抗するような状況では，「流行のはやりすたり」のような遷移現象がおこる可能性があることを示している．このような不安定な現象は一般に望ましいものではないと考えられる．これを避けるためには，次世代交通手段を導入する際に，プロモーション活動を行うとともにその結果発生しうる需要の増大をモニターし，普及後に流行をすたらせるような混雑現象が発生しないように，プロモーション活動の速度と供給容量の増強速度のバランスをとるようにするべきだろう．

今後の課題を２点述べる．本研究では，マルコフ連鎖で示される Day-to-day モデルを分析する際に，数学的な等価性を明示することなく Population Game の枠組みによって問題を「再定義」した．しかし，理論的厳密性からいえば，本来のマルコフ連鎖による定義を継承したまま Day-to-day モデルの挙動を数学的に評価する必要があるといえよう．また，本研究で分析した相互作用ネットワークの形状は限定的なものである．さらにいえば，相互作用ネットワークの非対称性は不安定性のための必要条件ではあるものの十分条件とはなっていない．より一般的な知見を得るためには，社会的相互作用ネットワークの構造に関する知見（スケールフリーネットワーク [7] など）を応用することにより一般的なネットワーク構造における分析を行い，どのような場合に不安定な挙動は発生するかをより詳細に分析する必要があろう．

謝辞：本稿は科学研究費補助金(若手(B)20760347)による研究成果を含む．この場を借りて感謝の意を表する．

参考文献

１）Durlauf, S. N.: A Framework for the Study of Individual Behavior and Social Interactions, Sociological Methodology, 31, pp. 47-87, 2001.
２）Brock, W. A. and Durlauf, S. N.：Discrete Choice with Social Interactions, The Review of Economic Studies, 68, pp235-260, 2001.
３）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.
４）Brock, W. A. and Durlauf, S. N.：Interactions-Based Models, Handbook of Econometrics, 5, pp3297-3380, 2001.

５）Hofbauer, J. and Sandholm, W. H.：Evolution in Games with Randomly Disturbed Payoffs，Journal of Economic Theory, 132, pp.47-69, 2007.
６）Hermann Haken：共同現象の数理─物理，生物，化学系における自律形成，東海大学出版会，1980.
７）Barabási, A.-L. and Albert, R.：Emergence of Scaling in Random Networks, Science, 286(5439), pp. 509-512, 1999.

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*

山辺数磨**・井料隆雅***・朝倉康夫****

自動車の社会的コストを削らすための方策のひとつとして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」を導入する方法がある．全く新しい交通手段の普及可能性を知るためには，普及メカニズムを動学的にモデル化し分析することが有用であろう．本研究では，混雑効果と，ある個人の意思決定に他人の選択結果が影響する効果，すなわち流行効果の２つを考慮し，さらに，個人間の相互作用を記述するネットワークも明示する交通機関選択モデルを用い，そのDay-to-dayの挙動をマルコフ連鎖と進化ゲーム理論を応用して検証した．それにより，Day-to-day挙動の安定性が個人間の相互作用の有無やそのネットワーク構造に依存することを示した．

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

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

Introducing a next generation travel mode that replaces conventional automobiles is one method to reduce social cost such as pollution and global warming. To examine a possibility of popularization of the new mode, it is important to construct and analyze a model describing the popularization process. This study builds a model that considers effects of congestion and interactions between users. The model also explicitly includes a network of mutual interactions. The behaviour of the model is examined with the evolution game theory and Markov process. It is revealed that the structure of the network affects the stability of the system.