

社会ネットワークとゲーム理論による交通需要のモデリング*

Travel Demand Model Based on Social Networks and Game Theory *

井料隆雅**・岡崎有吏子***・朝倉康夫****
By Takamasa IRYO**, Yuriko OKAZAKI***, and Yasuo ASAKURA****

1. はじめに

交通需要を記述するモデルはこれまで多くのものが提案されている。古典的でなおかつよく知られているモデルはWilsonのエントロピーモデル¹⁾およびAnasのモデル²⁾であろう。これらのモデルでは、すべての利用者が費やす一般化交通費用の総和と発生集中交通量を既知とし、これらを制約条件としてエントロピー最大化問題を解くことにより、いわゆる重力モデル、あるいはロジックモデルと同型の交通需要モデルを導出している。これらのモデルでは「一般化交通費用の総和と発生集中交通量の全利用者の総和」を制約条件とした最適化問題として需要モデルを定式化している。この考え方は、「交通需要は何らかの資源制約により規定されている」という視点に依拠していると考えられる。

「交通需要が資源制約に規定される」という考え方を個々人の交通行動に直接あてはめると、「各個人のもつ資源（時間や金銭など）の最適配分をモデル化すれば交通需要モデルをつくれる」という考え方にむすびつく。特に、移動には時間がかかることを考えれば、「時間資源の配分(Time Allocation)」と交通需要との間には緊密な関係があることが想像できよう。このような考え方に基づく交通需要モデルとして、Beckerによる時間配分の最適化問題の定式化³⁾とKitamuraによるランダム効用理論の適用⁴⁾を早期の成果として挙げることができる。そのほか、小林ら⁵⁾、河上ら⁶⁾、Bowen and Ben-Akiva⁷⁾、井料ら⁸⁾など、時間資源配分問題として交通需要モデルを構築する研究はいくつか見られる。

いっぽう、これまでの交通需要モデルでは時間を「誰と」使うか、ということについてはそれほど大きな注意は払われていなかった。交通は「目的をもった移動」と定義される。そして、人間がその生活の大半を社会的な

活動に費やすという前提を置くことがもし可能であれば、この「目的をもった行動」は「社会的な相互作用をするための行動」と置き換えて解釈することが多くの場面で可能となるだろう。たとえば、会社に行くことは「会社のほかの人と協同して働く」と解釈できる。また、買い物などに行くことは「商店と商品を介在して生産者と消費者が間接的に会う」と解釈できよう。このように、移動の目的を「社会的な相互作用」ととらえることにより、これまでの交通需要モデルの研究では外生的に与えていた「移動の目的」を一定の範囲で内生化することが可能になる。

本稿では、社会的相互作用を行うために発生する交通需要を、社会ネットワーク理論、時間資源配分問題、進化ゲーム理論の3つの考え方を適用してモデル化しその特性を分析する。本稿でおく仮定は「ある個人は、社会ネットワークで接続されている人とできるだけ多くかつ長く同じ場所にいられるように目的地を選ぶ」である。このような行動は他人の目的地選択行動に依存して決まるため戦略型ゲームを用いて定式化できる。このゲームに進化ゲーム理論を適用してその特性を示す。

2. 交通需要モデルの定式化

本節では社会的相互作用を考慮した交通需要モデルの定式化を行う。このモデルは「交通ネットワーク」「利用者の時間資源配分行動」「利用者間を結ぶ社会ネットワーク」の3つの要素からなる。そして、これらの要素を基に各利用者の利得が決定し、それによりゲームが定義される。これらについて以下で説明する。

(1) 交通ネットワーク

本稿では混雑現象が発生しない交通ネットワークを想定する。交通ネットワークはノードおよび一定の旅行時間をもつリンクで構成される。ノード間の移動時間はネットワーク上の最短経路時間で定義される。本稿では図1で示すような縦5ノード×横5ノードの格子状ネットワークを用いる。

*キーワード：進化ゲーム理論，交通需要モデル

**正員，博士(工学)，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻（神戸市灘区六甲台町1-1，TEL:078-803-6360，E-mail:iryoko@kobe-u.ac.jp）

***非会員，和歌山市

****正会員，工博，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

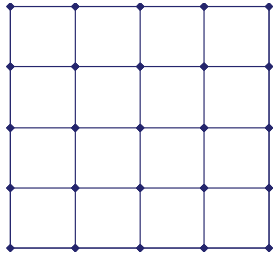


図1 交通ネットワークの構造

(2) 利用者の時間資源配分行動

交通ネットワーク上には N 人の利用者が存在するとする。利用者は交通ネットワークのノードのいずれか1つを「居住地」とする。利用者が1日のあいだに取る行動としては目的地への単純往復、すなわち「居住地から目的地へ移動し、目的地で滞在し、目的地から居住地へ帰る」のみを考える。

利用者の居住地は外生的に与えられる。本稿では、合計 1000 人の利用者が各ノードにランダムに居住しているとす。各ノードの居住者数は $B(1000, 1/25)$ の二項分布に従う（ただし互いに独立ではない）。

すべての利用者は1日のある特定の時刻（朝の時刻を想定）からある特定の時刻（夕刻の時刻を想定）までの1日の活動に割り当てられるとする。この2つの時刻には含まれた時間帯を T 個に分割し、これらに1から T までのラベルをつける。

利用者は T 個の時間帯を「目的地へ（から）の移動」あるいは「目的地での滞在」に割り振るとする。もし利用者が居住地に近い目的地を選択すれば、利用者は目的地により長い時間いることが可能になる。たとえば、利用者 i が自身の目的地から片道で時間帯 $t_i(d)$ 個分 ($2t_i(d) < T$) だけの旅行時間を要する目的地 d を選択すれば、この利用者の時間資源配分は下記のようなになる：

1. 1 から $t_i(d)$ まで……目的地への移動
 2. $t_i(d)+1$ から $T-t_i(d)$ まで…目的地での滞在
 3. $T-t_i(d)+1$ から T まで ……居住地への移動
- $t_i(d)=0$ であればすべての時間帯が目的地（この場合居住地と等しい）での滞在に費やされる。図2に目的地までの旅行時間と時間資源配分の関係の例を図示する。

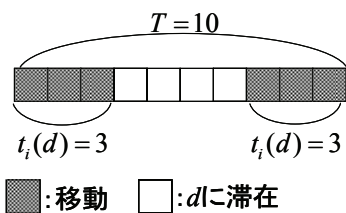


図2 目的地 d までの旅行時間と時間資源配分の例

(3) 利用者間を結ぶ社会ネットワーク

利用者間の社会的相互作用を記述するために社会ネットワークを用いる。社会ネットワークは、ノードを利用者とし、リンクを利用者間の社会的相互作用とするネットワークである。本稿では「2人の利用者のあいだにリンクが存在するとき限り、その2人は社会的に相互作用し、それ以外のときは相互作用しない」と考える。利用者 i と j ($i \neq j$) のあいだに社会的相互作用が存在することを $c_{ij}=1$ 、そうでないことを $c_{ij}=0$ と記す。次節で示すように、利用者は、社会的相互作用が存在する利用者と、できるだけ多く、できるだけ長い間同一の目的地に滞在できるように目的地を選択すると考える。

本稿では社会ネットワークの構造として完全ネットワーク（すなわち $c_{ij}=1$ for $\forall i \neq \forall j$ ）と、スケールフリーネットワークの2種類を考える。スケールフリーネットワークはその構造が確率的に定まるネットワークである。本稿では以下のルールでネットワークが確率的に生成されるとした：

1. まず全利用者から2人をランダムに選び出し、その2人の間にリンクを生成する。
2. この時点で利用者 i が持つ社会ネットワークのリンク数を数え、それを k_i とする。
3. $k_j=0$ である（すなわちリンクを持っていない）利用者 j をランダムに選ぶ。
4. 利用者 j と別の利用者 r の間にリンクを生成する。利用者 r が選ばれる確率は以下で定める：

$$p_r = \frac{k_r}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (1.1)$$

5. すべての利用者が1本以上のリンクをもったらリンクの生成を終了する。そうでなければステップ2に戻る

この生成方法はBarabási and Albert による⁹⁾。

(4) 目的地選択ゲームの定式化

(1) から (3) までの要素を組み合わせて N 人の利用者による目的地選択ゲームを構成する。そのために、以下ではゲームのプレイヤーと戦略と利得を明示する。

このゲームのプレイヤーは利用者である。利用者 i の戦略は1つの目的地 d_i を選択することである。本稿では純粋戦略のみを考え、混合戦略は考慮しない。

利用者 i の利得は

$$P_i(d_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^N c_{ij} \delta(d_i, d_j) \quad (1.2)$$

と定義する。ここで、 $\delta(d_i, d_j)$ は利用者 i が利用者 j と同じ目的地で過ごした時間を示し、以下のように定義される：

$$\delta(d_i, d_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ \min\{T - 2t_i(d_i), T - 2t_j(d_j)\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.3)$$

式(1.3)でmin演算子を用いるのは、「いっしょにいる時間」はもっとも滞在時間が短い利用者で規定されるからである。なお、本稿の前提では、図1のように目的地での滞在時間は全時間帯の中央部分に位置するため、より滞在時間が短い利用者の滞在時間帯は、より滞在時間が長い利用者のそれに必ず内包されることに注意したい。

3. 目的地選択ゲームへの進化ゲーム理論の適用

前節で定義された目的地選択ゲームは戦略型ゲームの一種である。このゲームの特徴は「プレイヤーの数が非常に多い」ということである。このようなゲームの特性を分析するときには進化ゲーム理論の考え方をを用いることがよいことが指摘されている¹⁰⁾。進化ゲーム理論では各プレイヤーの行動の決定を動学的に記述し、その動的な挙動がどのようになるか（特に、Nash均衡解へ収束するかどうか）を分析する。特に本稿では、各利用者は近視眼的な情報をもとにより効用の高い戦略を選ぶように自身の行動を更新すると考える‘Best Response Dynamics’を用いる。本稿で用いたBest Response Gameの動学は以下のとおり：

1. 利用者*i*をランダムに選び出す
2. 現在の各利用者の目的地選択行動を前提としたときの、利用者*i*の利得がもっとも大きくなる目的地をすべて求める。
3. 2.で求めた目的地が複数ある場合、そのうちの1つからランダムに選ぶ。ただし、現在選択している目的地がその中に含まれている場合、その目的地を選ぶ。
4. 利用者*i*の目的地を3.で決めた目的地にする。
5. 1.にもどる。

この動学による停留点はNash均衡解と等価である。すなわち、この動学がある点に収束すれば、それでNash均衡解のうち1つを求めたことになる。Best Response DynamicsではそのゲームのNash均衡解をすべて求められるとは限らない。ただ、このことは逆に「動学の結果として実現するNash均衡解だけを求める」という意味にとらえることもできる。すなわち、このような動学によって結果的に均衡解の精緻化が行われていると考えることも可能である。

4. 数値計算による解の特性分析

前節までで定式化した方法を用いて、数値計算によ

り目的地選択ゲームの解の特性を分析する。数値計算の際の条件は以下のとおり（一部は再掲）：

- 利用者数： $N = 1000$
- 交通ネットワーク：図1のとおり
- 時間帯数： $T = 100$
- リンク旅行時間：いずれも時間帯1個分
- 各ノードの居住者数：二項分布 $B(1000, 1/25)$ に従う。
- 社会ネットワーク：完全ネットワークと、スケールフリーネットワークの2種類

完全ネットワークとスケールフリーネットワークの2ケースについて、それぞれ1000ケースの計算を行い、その結果を集計する。集計の際のポイントは、Best Response Dynamics が収束するかということと、収束したときに各利用者の目的地選択がどのようになるか、ということである。各ケースの結果は以下の各小節で示す。

(1) 完全ネットワークの場合の結果

完全ネットワークの場合の場合は、1000ケースいずれにおいても

- Best Response DynamicsはNash均衡解に収束。
- 収束点では、全利用者が同一の目的地を選択

の2点の特徴が見られた。全利用者が同一の目的地を選択するという事は、どの居住地にすむどの利用者也、唯一の目的地に集結していることを意味する。ただし、どの目的地が全利用者に共通する唯一の目的地として選ばれるかはケースによって異なった。

どのようなノードが全利用者に共通する目的地として選択されたかを分析する。ノードがもつ特徴は「空間的な位置」「居住者数」の2つであるため、これらの特徴に照らし合わせて結果を評価する。

図3に、縦5ノード×横5ノードに並ぶ各ノードが1000ケースのうち何回「共通する目的地」として選ばれたかを図示する。どのノードも目的地として選ばれうるが、ネットワークの中心のほうより高い頻度で選ばれていることがわかる。これは、空間的に利便性の高いノードが共通する目的地となりやすいことを意味している。

図4では、ノードの居住者数と、そのノードが1000ケースのうち「共通する目的地」として選ばれた割合の

		Y				
		1	2	3	4	5
X	1	30	38	36	36	27
	2	35	37	49	40	42
	3	38	58	50	53	35
	4	34	43	47	46	38
	5	38	35	50	40	25

図3 各ノードが共通する目的地として選ばれた頻度

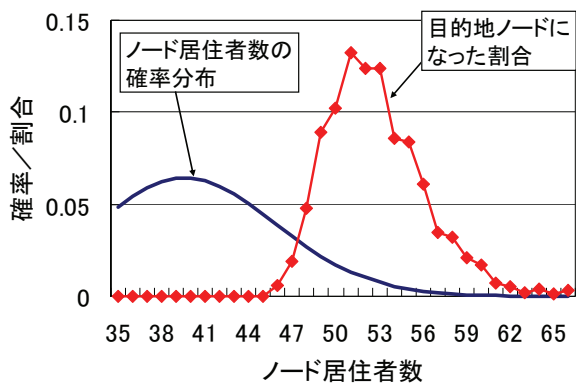


図4 ノードの居住者数と、そのノードが「共通する目的地」として選ばれた比率の関係

関係を示す。比較のため、各ノードの居住者数の確率分布 $(B(1000, 1/25))$ を重ねて示した。図4より、明らかに、ノードに多くの居住者がいるほうが、「共通する目的地」として選ばれやすくなっていることがわかる。

(2) スケールフリーネットワークの場合の結果

スケールフリーネットワークの場合は、1000ケースいづれにおいても

- Best Response DynamicsはNash均衡解に収束。
- 収束点では利用者は共通の目的地には集中しないで、複数の目的地に分散する

の2点の特徴が見られた。完全ネットワークの場合と異なるのは後者である。利用者は「共通の目的地」を持たず、各人異なった目的地を持ちうる。図5に各目的地を選んだ利用者数の割合をグラフで示した。比較のため、各ノードの居住者数の確率分布を重ねて示した。図5より、完全に共通した目的地は存在しないが、ある程度は特定の目的地へ集中する傾向があることはわかる。

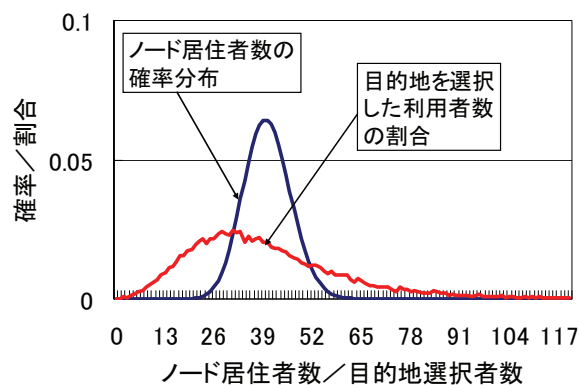


図5 目的地を選んだ利用者数の割合の分布

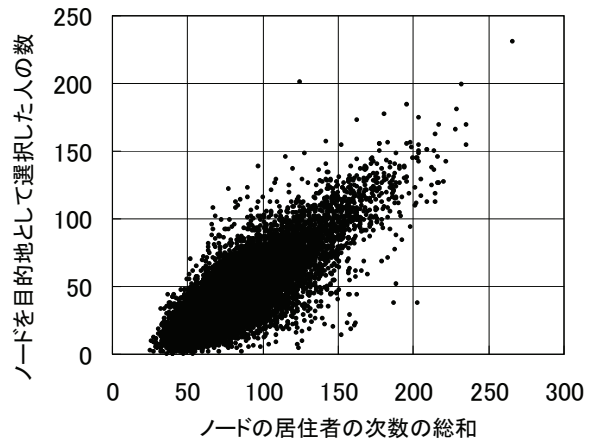


図6 各ノードの居住者の社会ネットワークにおける次数の合計と、そのノードを目的地として選んだ人数の関係

社会ネットワークがスケールフリーネットワークの場合において、目的地の選ばれやすさに影響しうる要因として、そこに住んでいる人がどれだけ多くの人と社会ネットワークで他人とつながっているか、というものを挙げる事ができよう。スケールフリーネットワークでは特定のノードの次数（リンクの接続数）が大きく、多くのノードの次数は少ないことが知られている⁹⁾。社会ネットワークでの次数が多い利用者、すなわち多くの人とつながっている人が住んでいれば、つながっているそれらの人はそこに集合する傾向があることが推測できる。このことは図6により確かめることができる。図6では、交通ネットワークにおける各ノードの居住者の（社会ネットワークにおける）次数の合計と、そのノードを目的地として選んだ人数の関係を散布図で示している。このように、居住者の次数とそこを目的地とする人の数の間には相関が認められる。

5. 考察と今後の課題

本稿では、社会的相互作用を行うために発生する交通需要を、社会ネットワーク理論、時間資源配分問題、進化ゲーム理論の3つの考え方を適用して「目的地選択ゲーム」としてモデル化しその特性を数値的に分析した。その結果、下記のことが（あくまでも特定の状況設定について数値的にだが）わかった。

1. ゲームのダイナミクス（Best Response Dynamics）は常に収束し、Nash均衡が実現される。
2. 目的地選択の行動は社会ネットワークの構造により大きく異なる。すべての人が社会的に関係している「完全ネットワーク」の場合は、すべ

ての人が同一の目的地に集結する。いっぽう、一部の人には多くの人と関係する一方、多くの人には一部の人としか関係しない「スケールフリーネットワーク」の場合には、同一の目的地に集結することはないが、多くの人と関係している人の居住地を目的地としやすい傾向にある。

1. の性質は、目的地選択ゲームにおいては進化のダイナミクスが安定であることを示している。この性質は、Best Response Dynamicsで目的地選択ゲームのNash均衡解を導出できるという点と、その解が現実の世界でも（同様のダイナミクスを前提として）実現しうる、という点の2点において好ましい性質といえる。目的地選択ゲームは基本的には「他人と同じ戦略をとる」ことである。このことは、このゲームが Supermodular Game と類似のもの（あるいはそのもの）であることを示唆する。SupermodularがPopulation Gameにおいて均衡解へ収束する性質をもつことを考えれば¹⁰⁾、このような性質を持つことは自然といえる。

2. の性質は、利用者の目的地選択行動が社会的なつながりに大きく左右されて決定されていることを示唆する。完全ネットワークのように全員がつながっていれば同一の目的地に集結する一方、関係が限定的であれば複数の目的地に分散する、という結果は、社会ネットワークの構造が交通需要の発生パターン、とくにその集中の度合いに大きく影響を与えていることを示唆している。このことは、社会ネットワークの構造を知ることが、交通需要の発生メカニズムを記述する際に必要であることを示唆しているといえよう。

今後の課題について述べる。本稿では格子ネットワークなど特定の状況のみを設定した分析に終始した。社会ネットワークと交通需要の関係についてより確固たる知見を得たければ、当然、一般的なケースについての分析が必要となる。そのためには、数値的でなく解析的アプローチを可能な限り導入する必要があるだろう。社会ネットワークの構造についても、スケールフリーネットワーク以外のものを検討する必要があると思われる。特に、リンクの密度と需要の集中の程度の間連については定量

的に分析する必要があるだろう。

謝辞：本稿で記した研究成果の一部は科学研究費補助金（若手（B）20760347）の援助によりなされた。

参考文献

- 1) Wilson, A.G.: *Entropy in Urban and Regional Modelling*, Pion Limited, 1970.
- 2) Anas, A.: Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models, *Transportation Research Part B: Methodological*, **17**(1), pp. 13-23, 1983.
- 3) Becker, G.S.: A Theory of the allocation of time, *The Economic Journal*, 1965. **75**(299): p. 493-517.
- 4) Kitamura, R.: A model of daily time allocation to discretionary out-of-home activities and trips, *Transportation Research Part B: Methodological*, **18**(3), pp. 255-266, 1984.
- 5) 小林潔司, 喜多秀行, 後藤忠博: ランダム限界効用にに基づく滞在時間モデルに関する理論的研究, 土木学会論文集, **576/IV-37**, pp. 43-54, 1997.
- 6) 河上省吾, 磯部友彦, 仙石忠広: 交通需要分析のための活動効用推定法, 土木計画学研究・講演集, **8**, pp. 323-329, 1986.
- 7) Bowman, J.L. and Ben-Akiva, M.E.: Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-28, 2001.
- 8) 井料隆雅, 長尾大, 朝倉康夫: 非効用型時間配分モデルを用いた交通ネットワーク構造の評価, 土木学会論文集D, **64**(2), p. 201-217, 2008.
- 9) Barabási, A.-L. and Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, **286**(5439), pp. 509-512, 1999.
- 10) Hofbauer, J. and Sandholm, W.H.: Evolution in Games with Randomly Disturbed Payoffs, *Journal of Economic Theory*, **132**(1), p. 47-69, 2007.