

知識の共有過程と異質性選好に着目した 社会ネットワーク形成に関する基礎的研究

小谷 仁務¹・横松 宗太²

¹正会員 京都大学特定研究員 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: kotani.hitomu.23m@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: yoko@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

従来の社会ネットワーク形成モデルでは、人種による分居のように、外生的属性が似た者同士がつながっていく構造の分析が中心であった。すなわち「外生的に与えられた属性」とそれに対する「同類性選好 (Homophily)」をもつ個人の存在がモデルの主たる仮定となっていた。それに対して、本研究では (1) 各自固有の知識や経験が交流によって共有され、それによって個人の「知識」が構成される構造と (2) その知識に対する選好に関し、同質性選好をもつ個人だけでなく、「異質性選好 (Heterophily)」をもつ個人の存在も考慮した社会ネットワークモデルを定式化する。そして、数値計算を用い、長期に現れるネットワークの構造や知識の分布の特徴を分析する。

Key Words : Social networks, knowledge sharing, heterophily, network formation model

1. はじめに

これまで、分居モデル (e.g., Schelling 1971¹⁾) や社会ネットワーク形成モデル (e.g., Droste *et al.* 2000²⁾, Johnson and Gilles 2000³⁾, Iijima and Kamada 2016⁴⁾) の多くは、プレイヤーの個人属性を、人種や年齢、立地などの「外生的に与えられた属性」として扱ってきた。さらに、自身と似た属性をもつ相手ほど、リンク形成による利得、すなわち交流による効用が大きい、ないしリンク形成の費用が小さいと仮定してきた。このように、似た者同士が結びつこうとすることは「同類性選好 (Homophily)」(e.g., Lazarsfeld and Merton 1954⁵⁾, McPherson *et al.* 2001⁶⁾) と呼ばれる。したがって、既存研究は、主として (1) プレイヤーに「外生的に与えられた属性」と (2) 「同類性選好 Homophily」の二つの仮定を採用し、似た属性をもつ人々が交流ないし集住するコミュニティの形成過程を記述してきた。

上記の枠組みに対して (1) 本研究は、外生的に与えられる個性やタイプではなく、他者との交流において変化する「知識」に着目する。相手とつながる動機の本質は、外生的に決まる相手の個性よりも、相手の知識に接したいという点にあると考えるからである。そして、あるプレイヤーが別の新たなプレイヤーと知り合いとなれば、相手から何かを学んだり経験したりして、相手をもつ固有の知識を新たに得ることができる。そのため、個人がもつ知識が交流において変化すると考

えるのは自然な想定だろう。とりわけ、本研究は、各プレイヤーが固有の知識や経験を先験的に有し、それが他のプレイヤーとの交流によって共有される過程を考える。そして、自身に固有の知識と、交流で得た他者固有の知識から、自身の「知識」が構成されるものとする。したがって、ここでいう「知識」は交流の中で変化するため、自分と相手の知識の「同質性」と「異質性」も、社会ネットワークの中で内生的に変化する。

さらに (2) 本研究は、コミュニティには、多様な選好をもつ人々が存在することに着目する。コミュニティには、自分と似た知識や経験をもつ相手と交流をしたいと思う人もいれば、自分と異なる知識や経験をもつ相手と交流をしたいと思う人もいるからである。本研究は、自分と相手の知識の「同質性」への選好 (同質性選好) だけでなく、「異質性」への選好 (異質性選好 Heterophily) も考慮する。すなわち、「同質性選好者」に加え、「異質性選好者」の存在にも着目する。

無論、プレイヤー間の知識の共有過程を考慮するネットワーク形成モデルはいくつか存在する (e.g., Jackson and Watts 1996⁷⁾, Carayol and Roux 2009⁸⁾)。しかし、それらは、各プレイヤーがもつ固有の知識の異質性に着目していない。つまり、プレイヤー j と k が同量の知識を持っていれば、プレイヤー i にとっては、 j と交流することと、 k と交流することは無差別である。そのため、交流の過程で変化する各プレイヤーの知識の同質性と異質性も、量ベースでしか議論できない。本研

究は、各プレイヤーがもつ固有の知識の異質性を考慮する定式化を行うため、共有過程を経て各プレイヤーがもつ知識の量と多次元性を議論できる。一方、プレイヤーの異質性選好を考慮するネットワーク形成モデル (e.g., Currarini et al. 2009⁹⁾) もわずかに存在する。だが、それらは、プレイヤーの外生的属性に着目するのみに留まっており、知識の共有過程と選好の多様性を同時に扱う研究は筆者らの知る限り存在しない。

以上を踏まえ、本研究は、プレイヤー間の知識の同質性と異質性がネットワーク内で内生的に変化し、この同質性と異質性に対する選好の多様性を考慮した社会ネットワーク形成モデルを定式化する。そして、長期に現れるネットワークの構造や、その下で各プレイヤーがもつ知識の分布の特徴を分析する。なお、上述の通り、本研究では、各プレイヤー固有の知識が共有される過程のみに着目するため、新たな種類の知識の創造や、新たな活動を生み出す資本としての知識の機能などは考えない。これらに取り組むことは今後の課題となる。

以下、2. では、モデルを定式化し、ネットワーク形成の動学過程を示す。3. では、同質性選好者数と異質性選好者数の割合が異なる三つのケースを対象に、数値計算によって、各ケースで長期に現れるネットワークの構造や、その下で各プレイヤーがもつ知識の量やプレイヤー間の知識の差異を分析する。4. では、本研究の結論と今後の課題を述べる。

2. 知識の共有過程と選好の多様性を考慮した社会ネットワーク形成モデル

(1) モデル

有限なプレイヤーの集合を $N = \{1, \dots, n\}$ とする ($n > 2$)。このプレイヤー間のネットワークは、各プレイヤーをノード、各プレイヤー間のつながりをリンクとするグラフによって表現される。 N のプレイヤー間のリンクの集合をネットワーク g で表す。プレイヤー $i \in N$ とプレイヤー j をつなぐリンクを ij で表す。もし $ij \in g$ であれば、ネットワーク g の下で、プレイヤー i と j が直接につながっており、 $ij \notin g$ であれば、プレイヤー i と j は直接につながっていないとする。例えば、 $n = 3$ の場合に、プレイヤー 1 と 2、2 と 3 がつながっているなら、 $g = \{12, 23\}$ となる。また、既存のネットワーク g にリンク ij がつながることで得られるネットワークを $g + ij$ で表し、 g からリンク ij が取り除かれたことで得られるネットワークを $g - ij$ で表す。すなわち、 $g + ij = g \cup \{ij\}$ 、 $g - ij = g \setminus \{ij\}$ である。一方、プレイヤー i と直接につながっているプレイヤーの集合はプレイヤー i の隣人 (neighbors) と呼ば

れ、 $N_i(g)$ で表す。すなわち、 $N_i(g) = \{j \in N | ij \in g\}$ である。さらに、プレイヤー i の隣人の人数は i の次数 (degree) と呼ばれ、 $d_i(g)$ で表す。すなわち、次数 $d_i(g) = |N_i(g)|$ である。

各プレイヤー i は、社会ネットワークとは独立な、自身 i に固有の知識、「自己起源知識」を $K_{ii} (> 0)$ だけもつものとする。つまり、 n 人のプレイヤーが存在すれば、 n 種類の自己起源知識が存在するものとする。そして、各プレイヤーの自己起源知識は、直接につながるプレイヤーと共有されるものとする。それだけでなく、その相手が別のプレイヤーとコミュニケーションをとることで、自身が直接につながらないプレイヤーへと共有されるものとする。例えば、プレイヤー i が j とリンクをつなぐことで、 i は j の自己起源知識を共有することができる。さらに j が k と直接にリンクをつなげば、 j が i に「 k という人と友だちになって、彼がこんなことを知っていたよ」と伝え、 i は直接つながらない k の自己起源知識を共有する。このような共有過程を通じて、各プレイヤーは、直接的または間接的につながるプレイヤーの自己起源知識を共有する。本研究では、プレイヤー i が共有過程を通じて獲得した他のプレイヤー j の自己起源知識を、 i がもつ j に関する「複製的知識」と呼ぶこととする。そして、自身の「自己起源知識」と、共有過程を通じて獲得した「複製的知識」によって、個人の知識 K_i が構成されるものとする。この知識 K_i を次のようにベクトルにより定式化する。

$$K_i = (K_{i1}, \dots, K_{ii}, \dots, K_{ij}, \dots, K_{in}). \quad (1)$$

ベクトルの要素 K_{ij} ($j \neq i$) (≥ 0) は、 i がもつ j に関する「複製的知識」の量を意味する。なお、リンクを介して共有される複製的知識の量は、ネットワーク内の距離に応じて減衰するものとする。ここでは、プレイヤー間の最短距離が 1 増える毎に $\delta \in [0, 1]$ だけ減衰することを仮定する。例えば、今、 $N = \{i, j, k\}$ かつ $g = \{ij, jk\}$ であれば、プレイヤー i は、直接につながる j と交流し、 j の自己起源知識を共有することで j に関する複製的知識 $K_{ij} = \delta K_{jj}$ を得る。一方、 j を介して間接的につながる k からは、 j を介して k の自己起源知識が伝達されるため、 i は k に関する複製的知識 $K_{ik} = \delta^2 K_{kk}$ を得る。そのため、 i の知識 K_i は $K_i = (K_{ii}, K_{ij}, K_{ik}) = (K_{ii}, \delta K_{jj}, \delta^2 K_{kk})$ となる。

以上の設定の下では、プレイヤー i から見た j の知識の同質性と異質性もネットワーク g の中で変化する。この同質性 S_{ij} と異質性 D_{ij} を次のように定式化する。

$$S_{ij} = \sum_{m \in N} \min \{K_{im}, K_{jm}\}, \quad (2)$$

$$D_{ij} = \sum_{m \in N} \max \{0, K_{jm} - K_{im}\}. \quad (3)$$

つまり、プレイヤー i から見た j の同質性は、互いの知

識の各要素の共通部分の大きさの総和である．そして、プレイヤー i から見た j の異質性は、知識の各要素において i がもたない j の部分の大きさの総和である．

さらに、上記の同質性を選好する「同質性選好者」と、その異質性を選好する「異質性選好者」が存在することを仮定する．ネットワーク g においてプレイヤー i が同質性選好者である場合の効用関数 $u_i^{\text{homo}}(g)$ と、異質性選好者である場合の効用関数 $u_i^{\text{hetero}}(g)$ をそれぞれ次のように定式化する．

$$u_i^{\text{homo}}(g) = \left(\sum_{j \in N_i(g)} S_{ij} \right) - c(d_i) \cdot d_i, \quad (4)$$

$$u_i^{\text{hetero}}(g) = \left(\sum_{j \in N_i(g)} D_{ij} \right) - c(d_i) \cdot d_i. \quad (5)$$

$c(d_i)$ は一人の隣人との交流にかかる費用関数である．

(2) 動学過程

n 人のプレイヤーが繰り返しゲームを行う．すなわち、 t 期 ($t \geq 1$) の期初のネットワークを g^t とし、プレイヤー i は g^t を所与として他のプレイヤーとリンク形成をするものとする．動学過程においては、Jackson and Watts (2002a)¹⁰、(2002b)¹¹をはじめとした研究で採用されている、外生的な攪乱を伴うネットワーク形成の動学を用いる．つまり、慣性 (inertia)、近視眼的 (myopic)、エラー/突然変異 (error/mutation) (以降、便宜上「エラー」と表記する) を伴う限定合理的な個人を想定する．これは、動学過程において、全員が同時にリンク形成の行動を起こせる訳ではなく (inertia)、行動を起こせるプレイヤーも目下の環境に近視眼的に反応し (myopic)、しばしば意思決定に誤りを伴うか、最適でない行動を試行すること (error/mutation) を考慮することである．エラーがなければ、外部性により複数均衡の一つに偶然ロックインされるような場合があるが、確率的動学の概念を用いることで、ある均衡から飛び出して他の状態に遷移できるようになり、長期的に見て最も頑健に存在するネットワークを導くことができる．

t 期には、Jackson and Watts (2002a)¹⁰ に倣い、以下の四つの step をとるものとする．

1st

t 期において、プレイヤー i と j のペア ij が確率 p_{ij} (> 0) でランダムに選ばれる．

2nd

ペア ij 以外のプレイヤーは、 t 期には何も行動を起こさない．つまり、ペア ij 以外のプレイヤーは即座に行動を起こさない、慣性 (inertia) をもつ．

3rd

1st step で選ばれたプレイヤー i と j は、次の原理

に従い、近視眼的 (myopic) にリンクをつなぐか切るかの意思決定を行う．なお、ペア ij は自分たち以外のプレイヤーは、前期にとった行動を変えないと考える．

3-1 もしリンク ij がネットワーク g^t 上にない場合、1人のプレイヤーの効用が厳密に増加し、かつ、もう一人のプレイヤーの効用が減少しなければ、リンクをつなぐ．そうでない場合は、リンクをつながない．

3-2 既にリンク ij がネットワーク g^t 上にある場合、そのリンクを切ることで、少なくとも一人のプレイヤーの効用が厳密に増加するならば、そのリンクを切る．そうでない場合は、リンクをつないだままにする．

4th

リンク形成の意思決定について、確率 ϵ ($0 < \epsilon < 1$) でエラー (error/mutation) が起こる．つまり、確率 $1 - \epsilon$ でこの意思決定通りの行動がとられ、確率 ϵ でこの意思決定とは逆の行動がとられ、ネットワーク g_1^t が形成される．

以上をまとめると、 g_1^t は次のプロセスで形成される．

- $ij \notin g^t$ の場合、
もし $u_i(g^t + ij) \geq u_i(g^t)$ かつ $u_j(g^t + ij) \geq u_j(g^t)$ が少なくとも一方は等号なしで成立するならば、確率 $1 - \epsilon$ で $g_1^t = g^t + ij$ 、確率 ϵ で $g_1^t = g^t$ とする．もしそうでなければ、確率 $1 - \epsilon$ で $g_1^t = g^t$ 、確率 ϵ で $g_1^t = g^t + ij$ とする．
- $ij \in g^t$ の場合、
もし $u_i(g^t - ij) > u_i(g^t)$ かつ/または $u_j(g^t - ij) > u_j(g^t)$ であれば、確率 $1 - \epsilon$ で $g_1^t = g^t - ij$ 、確率 ϵ で $g_1^t = g^t$ とする．もしそうでなければ、確率 $1 - \epsilon$ で $g_1^t = g^t$ 、確率 ϵ で $g_1^t = g^t - ij$ とする．

以上のプロセスによって形成されたネットワーク g_1^t が t 期の期末のネットワークとなり、それが $t+1$ 期の期初のネットワーク g^{t+1} となる． $t+1$ 期以降、上記のプロセスが繰り返される．

3rd step のリンク形成で、リンクをつなぐ場合と切る場合で非対称性が存在するのは、リンクをつなぐには双方のプレイヤーの同意を必要とするが、リンクを切るには一方のプレイヤーの同意のみで十分であることを意味している．

3. 数値計算事例

前章の動学過程から長期 ($t = T \gg 0$) に表れるネットワークや知識の分布の特徴を、Monte-Carlo シミュレーションによって分析する．

(1) 対象とするコミュニティ

分析では、同質性選好者数と異質性選好者数の割合が異なる次の三つのケースを取り上げる。

同質性選好者のみのケース

全プレイヤーが同質性選好者。

同質性選好者と異質性選好者が混在するケース

プレイヤー $i \in \{1, \dots, \bar{n}\}$ が同質性選好者，
プレイヤー $j \in \{\bar{n} + 1, \dots, n\}$ が異質性選好者
($1 \leq \bar{n} < n$)。

異質性選好者のみのケース

全プレイヤーが異質性選好者。

(2) ネットワークと知識についての指標

上記の各ケースにおいて、長期に表れるネットワークの「ネットワーク密度 (ND)」と「平均クラスター係数 (ACC)」と「連結ネットワークである割合」、そして、そのネットワークにおける各プレイヤーの「知識量」と各ペアの「知識の差」に着目する。以下に各指標の詳細を述べる。

a) ネットワーク密度

ネットワーク密度 (ND) (network density) は、全プレイヤー間でつながりうる最大のリンク数に対して、実際につながっているリンク数の割合を意味し、次式で表される (e.g., Newman 2010¹²⁾)。

$$ND = \frac{\sum_{i \in N} d_i}{2 \cdot \binom{n}{2}}. \quad (6)$$

b) 平均クラスター係数

ある個人の知り合い同士が知り合いであり、3 者が全て結ばれる三角形の関係はトランシティブティ (transitivity) やクラスターリング (clustering) と呼ばれる (e.g. Jackson 2008¹³⁾, Newman 2010¹²⁾)。特に、プレイヤー i の隣人の組み合わせ総数に対し、その隣人同士が実際につながっている組み合わせ数の割合は、個別クラスター係数 (individual clustering coefficient) $Cl_i(g)$ と呼ばれている。そして、各プレイヤーの個別クラスター係数の平均が、ネットワークの平均クラスター係数 (ACC) (average clustering coefficient) であり、次式で表される。

$$ACC = \frac{\sum_{i \in N} Cl_i(g)}{n}, \quad (7a)$$

where

$$Cl_i(g) = \frac{\#\{jk \in g | k \neq j, j \in N_i(g), k \in N_i(g)\}}{\#\{jk | k \neq j, j \in N_i(g), k \in N_i(g)\}}. \quad (7b)$$

c) 連結ネットワークである割合

いかなるプレイヤー i と j も直接的、間接的につながっているネットワークは連結ネットワーク (connected network) と呼ばれる (e.g., Goyal 2007¹⁴⁾)。本分析

では、Monte-Carlo シミュレーションによって出力されるネットワークが連結ネットワークである割合 r_{cn} に着目する。つまり、 r_{cn} を次のように表す。

$$r_{cn} = \frac{\sum_{mc=1}^M \mathbf{I}\{g_{mc} \in \tilde{g}_{cn}\}}{M}. \quad (8)$$

ただし、Monte-Carlo シミュレーションの繰り返し回数を $M (\geq 1)$ とし、 $mc \in \{1, \dots, M\}$ 回目の繰り返しによって出力されるネットワークを g_{mc} とする。また、連結ネットワークの集合を \tilde{g}_{cn} とする。関数 $\mathbf{I}\{\cdot\}$ は、 $g_{mc} \in \tilde{g}_{cn}$ であれば $\mathbf{I}\{\cdot\} = 1$ 、そうでなければ $\mathbf{I}\{\cdot\} = 0$ となる関数である。

d) 知識量

各プレイヤー i がもつ知識 K_i の量 \bar{K}_i を、知識 K_i の 1 次平均ノルムによって表す。

$$\bar{K}_i = \sum_{m \in N} K_{im}. \quad (9)$$

e) 知識の差

プレイヤー i と $j (i \neq j)$ がそれぞれもつ知識 K_i と K_j の差 G_{ij} を、二人のプレイヤーの知識のマンハッタン距離によって表す。

$$G_{ij} = \sum_{m \in N} |K_{im} - K_{jm}|. \quad (10)$$

二人の知識の各要素の値が近ければ、 G_{ij} は小さい値を示し、そうでなければ大きい値を示す。そのため、二人の知識の量が同じ場合でも、それぞれの知識が異なる要素、つまり異なる複製的知識で構成されていれば、知識の差 G_{ij} は大きな値を示すことになる。

(3) 関数とパラメーターの設定

数値計算におけるモデルの関数とパラメーターを以下のように特定化する。

$$c(d_i) = \bar{c} \cdot d_i^\alpha, \quad (11a)$$

$$\bar{c} = 0.2, \alpha = 1, \quad (11b)$$

$$\forall i, K_{ii} = 1, \delta = 0.3, \quad (11c)$$

$$p_{ij} = \binom{n}{2}^{-1}, g^1 = \emptyset, \quad (11d)$$

$$n = 20, \bar{n} = 15, \quad (11e)$$

$$\epsilon = \frac{1}{t+1} + \bar{\epsilon}, \quad (11f)$$

$$\bar{\epsilon} = 1.0 \cdot 10^{-4}, \quad (11g)$$

$$T = 10000, M = 100. \quad (11h)$$

ここでは、式 (11a)-(11b) より、一人の隣人との交流にかかる費用関数 $c(d_i)$ は、隣人数 d_i が増えるほど、交流に関するスケジュール調整費用や機会費用が増える状況を考える。つまり、 $\alpha (\geq 0)$ は時間的制約を意味し、ここでは、時間的制約のある状態 ($\alpha = 1$) を考える。また、式 (11c) より、各プレイヤーの自己起源知識の量を 1 に基準化する。式 (11d) より、動学過程の 1st

表-1 長期に現れるネットワークの特徴

	同質性選好者のみのケース	混在するケース	異質性選好者のみのケース
ネットワーク密度 (ND)	0.44	0.36	0.14
平均クラスター係数 (ACC)	0.92	0.72	0.00
連結ネットワークである割合	9%	30%	35%

step の一組のペアの選択確率 p_{ij} は一様分布を仮定する．そして、初期ネットワーク g^1 は、リンクが全く存在しない空ネットワーク (empty network) を仮定する．式 (11e) より、同質性選好者と異質性選好者が混在するケースは、「プレイヤー $i \in \{1, \dots, 15\}$ が同質性選好者、プレイヤー $j \in \{16, \dots, 20\}$ が異質性選好者」とする．式 (11f)-(11g) より、エラーの生起確率は、動学の初期の段階では大きいものの、時間が経つにつれて減少し、長期にはある微小な水準 ($\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon \rightarrow \bar{\epsilon}$) に留まるものとする．このエラーの下で長期に現れるネットワークが分析の対象となる．なお、式 (11h) の T は動学過程における最終期を表す．Monte-Carlo シミュレーションの繰り返し回数 M を 100 とする．

(4) 分析結果

上記の関数形とパラメーターの下、各ケースで、長期に表れるネットワークの構造と、その下で各プレイヤーがもつ知識 K_i の特徴を分析する．

Monte-Carlo シミュレーションで出力されるネットワークの「ネットワーク密度 (ND)」と「平均クラスター係数 (ACC)」と「連結ネットワークである割合」を表-1 に示す．なお、表中の「ネットワーク密度 (ND)」と「平均クラスター係数 (ACC)」は、Monte-Carlo シミュレーションにおける平均値である．

また、 mc 回目の Monte-Carlo シミュレーションにおいて出力される、プレイヤー i の知識量を \bar{K}_i^{mc} と表記し、プレイヤー i と j の知識の差を G_{ij}^{mc} と表記する．そして、 M 回の Monte-Carlo シミュレーションで現れる、 $\left\{ \left\{ \bar{K}_i^{mc} \right\}_{i=1}^n \right\}_{mc=1}^M$ の分布図を図-1 に表す．一方、 M 回の Monte-Carlo シミュレーションで現れる、 $\left\{ \left\{ G_{ij}^{mc} \right\}_{i=1}^n \right\}_{j \neq i; j=1}^n \right\}_{mc=1}^M$ の分布図を図-2 に表す．なお、各図の青色の柱は同質性選好者のみのケース、赤色の柱は同質性選好者と異質性選好者が混在するケース、黄色の柱は異質性選好者のみのケースを意味する．以上の得られた結果を基に各ケースの考察を行う．

a) 同質性選好者のみのケース

まず、同質性選好者のみのケースを考察する．このケースでは、表-1 が示す通り、密につながり、かつ多くのクラスターを有するネットワークが現れる傾向が

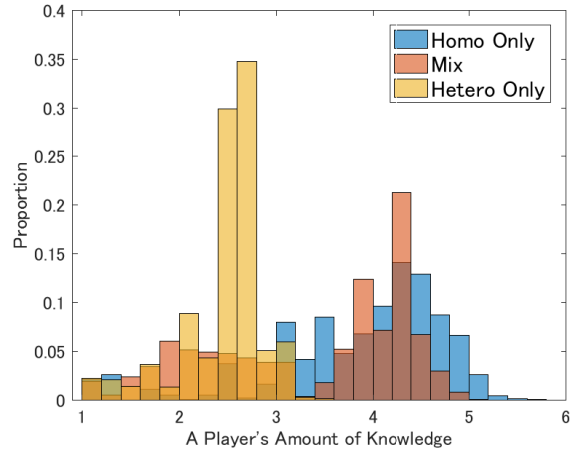


図-1 各プレイヤーの知識量の分布

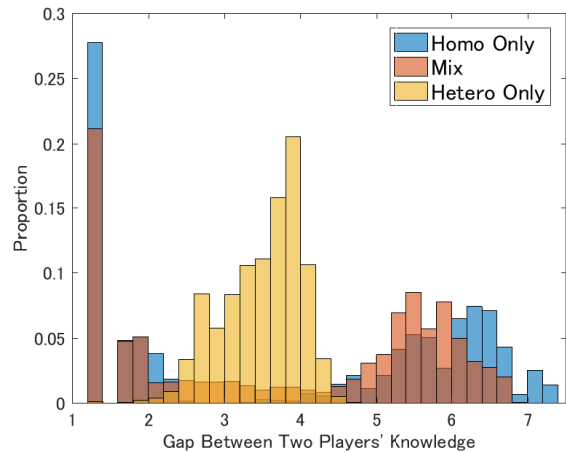


図-2 二人のプレイヤーの知識の差の分布

ある．そのため、図-1 が示す通り、他のケースに比べ、知識量が多いプレイヤー ($\bar{K}_i > 4.5$) の割合が大きい．

その一方で、表-1 が示す通り、連結ネットワークである割合は極めて小さい．そして、図-1 より、知識量をわずかしかもたないプレイヤー ($\bar{K}_i < 1.4$) が一定割合存在する．このことから、あるプレイヤーが孤立している、あるいは、他の一人のプレイヤーとだけつながっている状況が生じていることがわかる．

以上の知識量の格差のため、図-2 が示す通り、他のケースに比べ、プレイヤー間の知識の差が小さいペア ($G_{ij} < 1.4$) とその差が大きいペア ($G_{ij} > 6.0$) の割合が大きくなる。

上記のネットワーク構造が生じる理由を以下に述べる。同質性選好者は、相手と直接につながることで、相手と似た知識をもつようになる。そのため、互いにクラスターを形成し、ネットワーク密度が大きなサブネットワークをつくっていく。しかし、サブネットワークの成長過程で、プレイヤーの中には、リンク形成の機会が偶然訪れず、このサブネットワークに入ることができなかったプレイヤー i も存在しうる。今、このプレイヤー i が、サブネットワークを構成するプレイヤー j とリンク形成をする機会をもてれば、無論、 i は j とリンクを形成したい。しかし、 j は、サブネットワーク内で既に多くのリンクをもっており、追加的に生じるリンク形成の費用が増大しているため、 i とリンクを形成したいと思わない。そのため、 i はリンクを形成することができず、リンク数が少ないままとなる。このような理由で、同質性選好者のみのケースでは、密につながり、かつ多くのクラスターを有するものの、リンク数の少ないプレイヤーや孤立するプレイヤーが存在する連結ネットワークでないネットワークが長期に現れると考えられる。

b) 異質性選好者のみのケース

次に、異質性選好者のみのケースを考察する。このケースでは、表-1 が示す通り、ネットワーク密度は小さく、クラスターは全くできない。そのため、図-1 が示す通り、他のケースに比べ、知識量が多くないプレイヤー ($\bar{K}_i < 3.0$) の割合が大きい。

一方、表-1 が示す通り、連結ネットワークである割合は3つのケースの中で最も大きい。そのため、どのプレイヤーも、他のプレイヤーの自己起源知識をある程度共有している。この理由と、知識量が多くない理由のために、図-2 が示す通り、他のケースに比べ、プレイヤー間の知識の差が大きいペア ($G_{ij} > 6.0$) の割合は皆無に等しい。

上記のネットワーク構造が生じる理由を以下に述べる。異質性選好者は、自分とは異なる知識をもつ相手と交流したいため、他のプレイヤーとは間接的につながってほしい。そのため、クラスターはできず、その分、同質性選好者のみのケースと比べると、リンク数も少なくなる。このような理由で、異質性選好者のみのケースでは、クラスターが全くない、疎な連結ネットワークが長期に現れると考えられる。

c) 同質性選好者と異質性選好者が混在するケース

最後に、同質性選好者と異質性選好者が混在するケースを考察する。混在するケースでは、表-1 から分かる

通り、ネットワーク密度と平均クラスター係数は、同質性選好者のみのケースに比べ、小さいものの近い値を示す。かつ、連結ネットワークである割合は、同質性選好者のみのケースに比べ、より大きい。そのため、図-1 が示す通り、同質性選好者のみのケースと比べると、知識量が多いプレイヤー ($\bar{K}_i > 4.5$) の割合は小さいものの、知識量がわずかであるプレイヤー ($\bar{K}_i < 1.4$) の割合も小さい。また、異質性選好者のみのケースと比べると、より密で、多くのクラスターをもつため、知識量の最頻値は増加している。つまり、各プレイヤーがもつ知識量は、ある程度大きく、知識量の格差も大きくない状況であることがわかる。

そして、図-2 から分かる通り、同質性選好者のみのケースと比べると、プレイヤー間の知識の差が小さいペア ($G_{ij} < 1.4$) の割合は小さい。一方、異質性選好者のみのケースと比べると、知識の差が大きいペア ($G_{ij} > 6.0$) の割合は大きい。つまり、プレイヤー同士で異なる知識をもつ割合も大きいといえる。なお、上記のネットワーク構造が生じる理由の特定は今後の課題となる。

4. おわりに

本研究は、ゲーム理論を基礎とした社会ネットワークモデルを応用し(1)各プレイヤー固有の知識や経験がネットワーク内で共有されることで「知識」が構成され、それによって相手との同質性と異質性が内生的に決まることと(2)この同質性と異質性に対する選好が多様であることを考慮した社会ネットワークモデルを定式化した。そして、選好の多様性が、長期に現れるネットワークの構造や知識の分布にもたらす帰結を分析した。結果として、同質性選好者と異質性選好者が混在するケースでは、リンクが密につながり、かつクラスターを多く有する連結ネットワークが現れる傾向があることがわかった。その下では、各プレイヤーがもつ知識の量はある程度大きく、プレイヤー間で知識量の格差は大きくない。さらに、異なる知識をもつペアの割合が大きいこともわかった。

一方、既述の課題に加え、本研究はいつくかの課題を残す。第一に、本研究では各プレイヤーが自身に固有の知識である自己起源知識を等量もつ場合のみを考えた。今後は、プレイヤー間で自己起源知識の量に差がある場合を取り上げ、長期のネットワークにおける各プレイヤーの自己起源知識の分布構造を分析することも必要である。第二に、本研究は初期ネットワークが空ネットワークであることを仮定した。だが、例えば、初期ネットワークがいくつかのグループに分断されたネットワークであることを想定した分析も興味深

い。こういった選好や知識をもつプレイヤーが、分断されたネットワークの橋渡し役となるのかなどを明らかにすることも今後の課題となる。第三に、本研究はプレイヤーの選好を外生的に与えた。一方で、他のプレイヤー固有の知識を共有する過程で、プレイヤーの選好が内生的に形成されることも考えられる。今後、知識の共有過程に加え、選好の形成過程も考慮した社会ネットワーク形成モデルへと拡張する必要がある。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(C)(課題番号：16K06537)の助成を受けて行われました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Schelling, T. C.: Dynamic models of segregation, *Journal of Mathematical Sociology*, Vol.1, No.2, pp.143-186, 1971.
- 2) Droste, E., Gilles, R., and Johnson, C.: Evolution of conventions in endogenous social networks, Unpublished Manuscript, CentER, Tilburg University, The Netherlands, 2000.
- 3) Johnson, C. and Gilles, R.: Spatial social networks, *Review of Economic Design*, Vol.5, No.3, pp.273-299, 2000.
- 4) Iijima, R. and Kamada, Y.: Social distance and network structures, *Theoretical Economics*, Harvard University, 2016. (forthcoming)
- 5) Lazarsfeld, P. F. and Merton, R. K.: Friendship as a social process: A substantive and methodological analysis, *Freedom and Control in Modern Society*, pp.18-66, 1954.
- 6) McPherson, M., Smith-Lovin, L., and Cook, J. M.: Birds of a feather: Homophily in social networks, *Annual Review of Sociology*, pp. 415-444, 2001.
- 7) Jackson, M. O. and Wolinsky, A.: A strategic model of social and economic networks, *Journal of Economic Theory*, Vol.71, No.1, pp.44-74, 1996.
- 8) Carayol, N., and Roux, P.: Knowledge flows and the geography of networks: A strategic model of small world formation, *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol.71, No.2, pp.414-427, 2009.
- 9) Currarini, S., Jackson, M. O., and Pin, P.: An economic model of friendship: Homophily, minorities, and segregation, *Econometrica*, Vol.77, No.4, pp.1003-1045, 2009.
- 10) Jackson, M. O. and Watts, A.: The evolution of social and economic networks, *Journal of Economic Theory*, Vol.106, No.2, pp.265-295, 2002a.
- 11) Jackson, M. O. and Watts, A.: On the formation of interaction networks in social coordination games, *Games and Economic Behavior*, Vol.41, No.2, pp.265-291, 2002b.
- 12) Newman, M.: *Networks: An Introduction*, Oxford University Press, 2010.
- 13) Jackson, M. O.: *Social and Economic Networks*, Princeton University Press, 2008.
- 14) Goyal, S.: *Connections: An Introduction to the Economics of Networks*, Princeton University Press, 2012.

(平成 29 年 4 月 28 日 受付)