

ハイダーのバランス原理による動的過程の分析

—更新の同期性やトライアド選択型、転移、ソシオメトリ指標が収束と心情配置に与える影響—

水谷 聡秀 (関西大学)

Analysis of dynamic process by the principle of Heider's balance

Influence on convergence and sentiment configuration caused by synchronization of change, triad selection type, triad rules and sociometric indices

Mizutani Satohide (Kansai University)

1. 問題

人は他者に対して肯定的心情 (sentiment) や否定的心情を抱く。心情はいつも同じではなく何らかの要因で変化する。対人の相互作用を通して心情が変化し、人の集合が自己組織化していくことを念頭に置き、何が収束や心情配置に影響を与えるかを明らかにすることが本研究の狙いである。

1.1 バランス理論と実証研究

本研究では、心情変化の要因の一つとして、第三者が関与するトライアド (三者関係) の規則を取り上げる。この観点から考える際には、Heider (1958) のバランス理論が有用である。この理論によれば、トライアドが調和的ではないインバランス状態では、認識主体は不快や緊張を感じる。このとき不快や緊張が解消されるよう、トライアドは調和的なバランス状態へ向かうとされる。さらに、Heider (1946, 1958) はトライアドを構成する 3 つの関係の符号の積が正であるときトライアドはバランス状態だとし、負のときインバランス状態だとした。トライアドがインバランス状態であれば、トライアドのいずれかの関係の符号が変わることで、トライアドがバランス状態へと向かうことを提唱している。後の研究者はこの理論を実証的に検討している。ひとつは、トライアドを構成する 2 つの関係から残りの 1 つの心情関係を予期する観点からこの理論は支持されている (水谷, 2006; Morrisette, 1958)。ほかに、トライアドが快か不快という観点からはこの理論は支持されないことが多い (Jordan, 1953; 奥田, 1995; Price, Harburg, & Newcomb, 1966)、実験参加者が十分に考える時間を持てば、効果は比較的にか小さいものの、この観点からもバランス理論が支持される (Cacioppo & Petty, 1981)。

1.2 理論的な時系列変化

近年、この理論を用いた動的過程の研究が進められている。集団においてすべての行為者 (actor) が、Heider のバランス原理のみで心情が変化するとき、どの程度の時間を経て、あるいは集団はどのような状態になるのかが数的に検討されている (藤澤・水谷・小杉, 2003; Hunter, 1978; Kułakowski, Gawroński, & Gronek, 2005; Mizutani, 2004; 水谷, 2004; 水谷, 2015; 水谷, 2016; 水谷・小杉・藤澤, 2002; Nomura, 2004; Wang & Thomgate, 2003 など)。これらの研究は、特定の条件だが、動的な振舞いが時間を経て収束し、すべてのトライアドがバランス状態になることを示したうえで、さまざまな分析をしている。人数と肯定的、否定的な心情の配置にもよるが、全体の (大域的な) インバランス度は始めから徐々に下がってバランス状態になるというより、ある程度の高さが続いたうえで急激に下がる傾

向が見られる (Kułakowski et al., 2005; 水谷, 2016)。さらに、ダイアド (二者関係) に関する全体の非対称性も全体のインバランス度と連動して、急激に下がる傾向が見られる (水谷, 2016)。これらは、ダイアドには符号の非対称 (行為者 a から b の符号と b から a の符号が異なる状態) が存在することを前提とした研究である。そして、Heider のバランス原理のみによる相互作用を通してトライアドがバランス状態へ向かうにつ、互報性原理が働かなくとも、ダイアドが互報性 (対称性) にも向かうことを意味している。

1.3 バランス状態と互報性

水谷他 (2002) や藤澤他 (2003)、水谷 (2004) は 3 者の、Mizutani (2004) や Nomura (2004)、水谷 (2015) などは 3, 4 者以上の完全結合型ネットワークで、同じ Heider のバランス原理でも異なる計算モデルを用いている。彼らは、特定の条件で全ダイアドと全トライアドで互報性の伴ったバランス状態になることを示している。なお、藤澤他 (2003) はダイアドの対称性が推移性の伴ったトライアドにおいて導かれることに着目している。また、水谷 (2004) は 3 者間のすべての有向辺において推移性の伴っていないトライアドでバランス原理のみが働いた場合に、収束状態でダイアドが対称性になるとは限らないことを示している。これには単純な理由があり、2 つの分離した有向辺のトライアドでバランス原理が働くからだ指摘している。これに対して、3 者間のすべての有向辺において推移性の伴ったトライアド (セミサイクル) でバランス原理が働く場合にはこのように分離することはない。こういったことから、トライアドにバランス原理が働くとき推移性という条件が付加されることで、バランス原理による相互作用がダイアドの対称性を導くとも考えられる。以上は 3 者での相互作用にもとづく議論であった。しかし、水谷 (2015) は人数が増えると、 N 者間のすべての有向辺において推移性の伴っていないトライアドでバランス原理のみが働いていたとしても、収束状態ではすべてのダイアドは対称性になることを示した。推移性の条件が付加されることが必要条件になるのは、人数が少ない場合に限定されることが考えられる。

1.4 収束状態の構造と予測

以上の動的過程の研究は特定の条件において、時間を経てすべてのダイアドで互報性を伴いつつすべてのトライアドがバランス状態になることを示している。このような状態ではどのような構造になっているかについては、すでに対人関係の静的な構造についてグラフ理論の観点から研究を進めていた Cartwright & Harary (1956) が示している。すべてのトライアドがバランス状態であるときには、行為者の集合が 2 つに分かれ、

集合内ではすべての関係は正で結ばれて、集合間ではすべての関係は負で結ばれることを明らかにしている。なお、ときにはどちらかの集合が空の場合がある。これらは、すべて仲が良い状態か、2つの派閥 (clique) のある状態、1人だけ孤立する状態だといえる。動的過程を検討している上であげた先行研究のうちほとんどは、これらの状態がどのような初期の心情布置で生じるかも含めて検討している。最近の検討では、水谷 (2015) はどういったソシオメトリー指標がどのように予測できるかは複雑であるが、非対称性とインバランス度、否定的心情の数は重要であるとしている。とくに、否定的心情の数が解釈の容易性から重要だとしている。初期の心情布置で否定的心情が多ければ、収束状態では否定的心情の多いバランス状態になる傾向があるという点で解釈が容易である。このように解釈した上で、ほかの指標がこの傾向を崩している、あるいは促していると考えたほうが説明しやすいだろう。

1.5 変化規則と作動

ところで、心情はどのようにして変化するのかという問いは、でたらめに変化するのではなければ、心情はどのような規則にしたがって変化するのかという問いでもある。後述するモデルの構築上、ある心情の変化を生み出す規則を変化規則とよぶことにする。各心情の変化は、何らかの変化規則が心情に適用されることで、別の言い方をすれば各心情に変化規則が作動することで生じる。変化規則がある心情に作動しなければ、その心情は変化しない。現実場面においては変化規則が存在しても、変化規則が作動したりしなかったりする場合がある。このように考えれば、この段落のはじめの問いは、どのような変化規則があるのか、さらには変化規則がどのように作動するのかという問いに分けることができよう。

先述した理由から、本研究で扱う変化規則はトライアド規則であり、Heiderのバランス理論にもとづいている。たとえ1つの理論に限定したとしても、後述するように変化規則には複数の種類がある。また、作動の仕方にも違いがある。モデル構築によっては、変化規則と作動の仕方に関わるパラメータに値を設定できる。先行研究はいくつかの種類と設定で部分的に体系立てて行われているが、研究によって扱う種類や設定が異なっている。このような事情から、どんな結果に一般性があり、変化規則や作動の仕方 (心情の値を更新するという意味で、ここでは2つまとめて更新方法とよんでおく) により結果がどのように異なるかを調べる必要がある。現状では、先行研究において特定の更新方法で得られた結果は各研究で限定的なのか、ほかの更新方法でも同じような結果になるのか判断できない。そこで、先行研究で検討されてきた収束するか否か、収束した場合に互報性が成立するか否か、収束時間、収束状態での心情布置の予測について、バランス原理によるさまざまな更新方法で体系的に検討する。

2. モデルの構築

2.1 先行研究のモデルとの関係

本研究では、水谷 (2016) のモデルとここで加えたトライアド単一選択型のモデルを用いる。先行研究のモデルによる結果を含めて、更新方法により異ならないかを体系的に検討するために、複数の型のモデルを用いる。

心情の変化規則には、藤澤・雨宮・木村 (1991) のモデルに基づいて構築された水谷・小杉・藤澤 (2002) のモデルがあり、本研究ではこのモデルに包含されている主要部分を組み込む。水谷他 (2002) のモデルは値付き有向グラフを扱え、正負の2

値のみも包括的に扱える。そしてトライアド規則として Heider のバランス原理に着目してモデルを構築し、シミュレーションを行っている。この研究ではトライアド規則において、3者に限定されたモデルを用いている。また、トライアド規則のみで検討するだけでなく、ダイアド規則として互報性原理の影響を含めても検討している。本研究では、目的に合わせて水谷他 (2002) のモデルのトライアド規則のみを用い、連続値の処理を省いた水谷 (2016) のモデルを用いる。

2.1.1 4者以上の場合のトライアド選択

4者以上のモデルについては、Wang & Thomgate (2003) や Mizutani (2004), Nomura (2004) などがあるが、Wang & Thomgate (2003) はダイアドの非対称性を扱っていないので、後者の2つのモデルを参考にする。また、以下では完全結合型ネットワークについて述べる。4者以上だと、各心情の変化の際にどのトライアドを選択するかという問題が生じる。3者のときには第三者は1人だけであるが、4者以上では心情を構成する2者以外の第三者は2人以上である。Mizutani (2004) は各心情に関わるすべてのトライアドを選択するモデルを用いている。これに対して、各心情に関わる1つのトライアドをランダムに選択する手法もある。後者については、Nomura (2004) の用いたモデルの特徴に近い。すべての行為者が同時にほかの2者をランダムに選んで、推移性の伴ったトライアドのなかでこの2者への有向辺のどちらかが更新されるという手続きを取っているからである。Mizutani (2004) が用いた前者をトライアドの全選択型、後者を単一選択型と呼んでおく。現実場面ではこのあいだの数個のトライアドを選択して、心情が変化することもあろう。そこで、水谷 (2016) はトライアド選択確率を設けて、複数のトライアドをランダムに選択する場合を扱えるようにした。これを複数選択型と呼ぶことにする。ここで、選択確率を1.0にすれば、この手法はMizutani (2004) のトライアド全選択型を扱える。また、選択確率を $1/(N-2)$ と設定し (N は人数である)、トライアドの選択を1つ程度に留めることができる。そのため、このトライアド選択型は単一選択型に近くなる。しかし、後述する選択確率によるトライアド選択の手続きでは、厳密には常にランダムに1つのみを選択できる単一選択型を扱えない。そこで、先行研究のMizutani (2004) と Nomura (2004) の結果の違いを検討するため、本研究では単一選択型も用いる。

2.1.2 各心情での変化規則の作動

ある時点において、トライアド規則がすべての心情に作動するのか (同期更新)、限られた心情に作動するのか (非同期更新) という更新の同期性については、研究によって異なる。水谷他 (2002) や Mizutani (2004) は同期更新を扱い、藤澤・水谷・小杉 (2003) は非同期更新を扱っている。なお、藤澤他 (2003) では時点ごとにランダムに1つの心情にトライアド規則が作動する。現実場面では、同期更新とこの種の非同期更新とのあいだでトライアド規則が作動するであろう。そこで、水谷 (2016) はトライアド規則の作動確率を設けて、時点ごとに複数の心情にトライアド規則が作動する場合を扱えるようにした。ここで、作動確率を1.0にすれば、この手法は水谷他 (2002) や Mizutani (2004) の同期更新を扱える。また、作動確率を $1/(N(N-1))$ と設定すれば、時点ごとにトライアド規則が作動する心情を1つ程度に留めることができる。そのため、この更新方法は藤澤他 (2003) の非同期更新に近くなる。しかし、後述する作動確率によるトライアド規則作動の手続きでは、厳密には常にランダムに1つの心情だけでトライアド規則が作動する藤澤他 (2003) の非同期更新を扱えない。こういった問題もあるが、本研究では更新の同期性に関しては、作動確率を低いのも含めたうえで、いくらか変えて検討するだけにした。

2.2 バランス原理による心情の変化規則

本研究では、心情がトライアド規則で変化するとし、Heiderのバランス原理に焦点を当てる。行為者*i*から行為者*j*への心情を W_{ij} として表す。 W_{ij} の取りうる値として、心情の符号のみを対象とする。また、二者間において非対称な関係も扱う。 $W_{ij}=1$ のとき心情は肯定的であり、 $W_{ij}=-1$ のとき心情は否定的である。時点*t*から*t+1*までの心情 W_{ij} (以降では*i*≠*j*)の変化量 ΔW_{ij} はバランス原理で決まるとした。有向辺のトライアドを考えれば、バランス原理が働く変化規則には4種類がある(Hunter, 1978)。これらを変化量で表すと、4種類の変化量は次の式で示される。なお、式(1)から(4)において*k*≠*i*, *j*である。

$$\Delta W_{ij} = W_{ik}W_{jk} - W_{ij} \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta W_{ij} = W_{ik}W_{kj} - W_{ij} \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta W_{ij} = W_{ki}W_{kj} - W_{ij} \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta W_{ij} = W_{ki}W_{jk} - W_{ij} \dots\dots\dots(4)$$

これらを藤澤(1997)や雨宮(2001)にならって順に並列転移、直列転移、逆並列転移、逆直列転移とよぶ。また、上の式(1)を変形すれば、 $W_{ij}^{(t+1)} = W_{ik}^{(t)}W_{jk}^{(t)}$ となる。式(2)から(4)も同様に変形できる。

2.3 作動確率

このように心情に関する変化規則の一つ、トライアド規則のモデルを用いるが、各心情にトライアド規則が作動する方法はいくつかある。各*t*でネットワークにあるすべての心情に変化規則が適用される同期更新の場合(水谷他, 2002; Mizutani, 2004)やランダムに1つの心情に適用される非同期更新の場合(藤澤他, 2003)などがある。現実場面では、このあいだを考えたほうがよい場面がある。そこで、水谷(2016)は、各心情に変化規則が適用される作動確率 p_i を設けることにした。具体的には、有向辺ごとに[0, 1)の1様乱数を生成し、この値が p_i 未満であるなら心情 W_{ij} に変化規則が適用され、この W_{ij} は値の更新対象となる。作動の仕方として、作動確率 p_i が1.0のときにはすべての心情に適用される同期更新を、1.0未満のときには非同期更新を実現できる。

2.4 トライアド選択型

人数*N*が4以上のときには、 W_{ij} を構成する*i*と*j*以外の第三者は2人以上となる。トライアド規則で選択されるトライアドの数は1つでも、2つ以上でも考えられる。そこで、トライアド選択型を、全選択型、複数選択型、単一選択型に分類した。水谷(2016)はトライアド選択確率を設けているが、彼が用いた手法は複数選択型に分類される。そこでは、ある心情 W_{ij} が更新対象であるとき、この W_{ij} を含む各トライアドを選択する確率 p_2 を設けている。具体的には、 W_{ij} を含むトライアドごとに[0, 1)の1様乱数を生成し、この値が p_2 未満であるトライアドが選択される。選択確率 p_2 が1.0のときには全選択型に相当する。Mizutani(2004)は全選択型に相当する手法を用いている。ただし、彼の研究のモデルは連続値を扱っているため、その後の処理が本研究の扱う処理と異なる。本研究では単一選択型の場合には、ランダムに必ず1つだけのトライアドが選択される。単一選択型では、1つのトライアドのみでバランス原理が働いて更新対象の心情 W_{ij} が変化するので、本研究では式(1)から式(4)のうちいずれかが適用される。これに対して、複数選択型では、選択された各トライアドでバランス原理が働いて更新対象の心情 W_{ij} が変化すが、並列転移を取り上げれば、次の式で*t+1*の心情 W_{ij} が決まる。

$$W_{ij}^{(t+1)} = f\left(\sum_{k \in T_{ij}^{(t)}} W_{ik}^{(t)}W_{jk}^{(t)}\right) \quad (k \neq i, k \neq j) \dots\dots\dots(5)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ W_{ij}^{(t)} & (x = 0) \dots\dots\dots(6) \\ -1 & (x < 0) \end{cases}$$

ここで、 $T_{ij}^{(t)}$ は更新対象 W_{ij} を含むすべてのトライアドのうち p_2 の確率で選択されたトライアドを構成する*i*と*j*以外の第三者の行為者の集合である。並列転移以外も同様の式で心情 W_{ij} が更新される。

2.5 指標と収束判断

基本的な心情配置の指標として、負の心情数やダイアドの非対称性、トライアドのインバランス度といったソシオメトリー指標がある。負の心情数は数え上げればよく、有向辺の完全結合型ネットワークでは最大 $N(N-1)$ になる。非対称性に関しては、各関係の非対称性 M_{ij} を $|W_{ij} - W_{ji}|$ で求め、全関係における指標の平均 $\sum_i \sum_j M_{ij} / (N(N-1))$ をネットワーク全体の非対称性 M とする。なお、*i*≠*j*である。すべての関係において互報性が成立すれば $M=0$ である。インバランス度に関しては、各関係のインバランス度 B_{ij} を、並列転移から算出する場合には $\sum_k |W_{ik}W_{jk} - W_{ij}| / (N-2)$ で求め、直列転移では $\sum_k |W_{ik}W_{kj} - W_{ij}| / (N-2)$ 、逆並列転移では $\sum_k |W_{ki}W_{kj} - W_{ij}| / (N-2)$ 、逆直列転移では $\sum_k |W_{ki}W_{jk} - W_{ij}| / (N-2)$ で求める。転移が混在した場合には4種類の転移のインバランス度をすべて加算し4で除した値とする。全関係における指標の平均 $\sum_i \sum_j B_{ij} / (N(N-1))$ をネットワーク全体のインバランス度 B とした。なお、*i*≠*j*で*k*≠*i*, *j*である。すべてのトライアドがバランス状態であれば $B=0$ である。

本研究の目的により、収束判断について考えなければならぬ。インバランス度 B が0になったとき、今回のモデルでは全く心情変化が起きないため、収束したと判断した。収束に要する時間(収束時間)はこのときの*t*とした。なお、各試行で働いている転移に関するインバランス度を用いた。

3. シミュレーション

3.1 目的

本シミュレーションの第1の目的は、Heiderのバランス原理のみで心情が変化するとき、更新方法によって、収束するか否か、収束する場合には互報性が成立するか否か、収束時間は異なるのかを把握することである。第2の目的は、更新方法に加えて心情配置のソシオメトリー指標から、収束するか否かと、収束する場合には収束後の心情配置をどのくらい予測できるのかを把握し、予測に重要な特徴を検討することである。

3.2 方法

人数*N*が3, 4, 5, 6から構成される完全結合型ネットワークを用いた。各ネットワークにおいて並列転移、直列転移、逆並列転移、逆直列転移のうち1つのみを働かせる場合と4種類の転移のいずれかがランダムに働く混在した場合の5種類の条件、作動確率 p_1 が1.0, 0.9, 0.5, 0.1である場合の4つの条件、トライアド選択型が全選択型、複数選択型、単一選択型である場合の3つの条件を設けた。なお、複数選択型での選択確率 p_2 を0.5に設定した。5×4×3条件のそれぞれにおいて別個に300種類の初期の心情配置を生成した。このとき、各試行に

において初期布置で負の心情になる確率を設け、各心情 W_{ij} には $[0, 1)$ の一様乱数がこの確率よりも小さいときに -1 とし、そうではないときに $+1$ とした。また、試行ごとに確率は $[0, 1]$ の一様乱数で決めた。正負の極端な数を伴った心情布置が正負の同程度の数を伴った心情布置と同じくらい生成するためである。各 N において以上の条件設定と初期布置で 18,000 試行のシミュレーションを行った。また、各試行においてシミュレーションを 3 人から 5 人の場合には t が 0 から 10^6 ターンまで、収束に時間を長く要する 6 人の場合には 0 から 2×10^6 ターンまで行った。収束する場合には収束する時点で更新を終了した。

転移を働かせる種類として、4 種類の転移を混在させて働かせる変化規則があるが、式(1)から(4)のいずれかを時点 t ごとに、そして更新対象の心情 W_{ij} ごとにランダムに選んで心情に適用した。さらに、全選択型を含めて複数選択型では更新対象 W_{ij} を含むトライアドのうち選択された各トライアドにおいても、このトライアドごとに 4 種類の転移のうちいずれかをランダムに選んで心情に適用した。

表 1. 非収束の布置数

N	p_1	全選択型					単一選択型
		並列	直列	逆並列	逆直列	混在	直列
3	0.1	0	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	0	0	0	0
	0.9	0	0	0	0	0	0
	1.0	0	188	0	0	0	187
4	0.1	15	132	12	142	0	0
	0.5	19	167	8	141	0	0
	0.9	11	111	12	112	0	0
	1.0	15	202	15	104	0	195
5	0.1	0	151	0	183	0	0
	0.5	0	114	0	188	0	0
	0.9	0	111	0	149	0	0
	1.0	108	189	102	197	16	0
6	0.1	0	220	0	233	0	0
	0.5	0	197	0	227	0	0
	0.9	1	170	2	185	0	0
	1.0	11	200	17	159	1	0

N 人数、 p_1 作動確率。複数選択型ではすべて0であり、単一選択型では直列転移以外はすべて0であったため、表には提示しなかった。

3.3 結果

3.3.1 収束・非収束、互報性の成立

トライアド選択型が複数選択型の場合にはすべての試行は収束した。単一選択型の場合には、作動確率が 1.0 (各心情の同期更新) で、直列転移のみが働いたときには、収束しない試行が見られた。ただし、3, 4 人の場合に見られた。全選択型の場合には、各転移において同期更新でなくとも収束しない試行が見られた (表 1)。

収束した場合、並列転移、直列転移、逆並列転移のそれぞれ 1 つのみ、混在した転移のいずれかが働いても、人数に関わりなくすべての試行において収束後は非対称性 M が 0 であり、互報性が成立していた。収束の判断にインバランス度 B が 0 という基準を用いているので、収束状態ではすべてのトライアドは Heider のバランス状態であり、どの試行においてもネットワークはバランス状態に至っていた。収束していたとしても、逆直列転移のみが働くときには人数が 3 人と 4 人の場合には M が 0 にならない試行が見られた (表 2)。しかし、人数が 5 以上の場合にはすべての試行において M が 0 になった。以上の結果

表 2. 収束状態での非対称性の布置数 (逆直列転移)

N	p_1	全選択型	単一選択型	複数選択型
3	0.1	194	185	199
	0.5	201	194	182
	0.9	181	183	209
	1.0	202	175	185
4	0.1	70	201	198
	0.5	73	202	190
	0.9	97	191	192
	1.0	96	186	189
5	0.1	0	0	0
	0.5	0	0	0
	0.9	0	0	0
	1.0	0	0	0
6	0.1	0	0	0
	0.5	0	0	0
	0.9	0	0	0
	1.0	0	0	0

N 人数、 p_1 作動確率

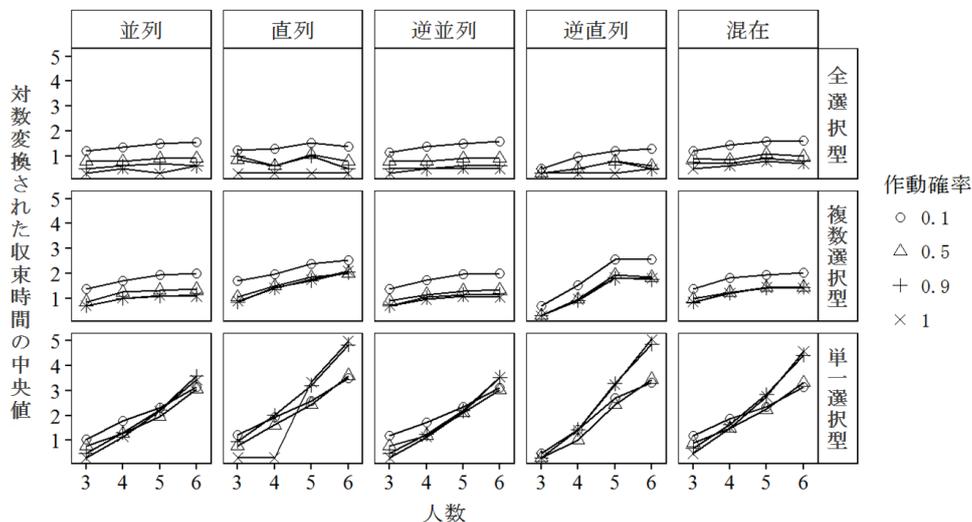


図 1. 各条件と人数による収束時間の違い

は、互報性の原理が働かなくとも、条件付きで Heider のバランス原理のみで互報性が成立することを示している。

3.3.2 人数とその他の条件による収束時間の違い

一般的に人数が増えるほど、収束するまでの時間(収束時間)は長くなった。図1には各条件における収束時間について、対数変換後に求めた中央値を示した。収束時間が0の場合もあるので、収束時間を $\log_{10}(x+1)$ で変換した。とくに、単一選択型の結果は人数が増えるごとに収束時間が長くなる幅が大きくなる特徴を示した。単一選択型のなかでも、直列転移と逆直列転移において作動確率が0.9と1.0でこの特徴が際立っていた。これらの条件では6人になると収束時間の中央値が約100,000になった。ほかの選択型では6人になっても収束時間の中央値は1000未満であったし、並列転移や逆並列転移、混在した転移では、長くとも中央値は約100であった。

また、全選択型と複数選択型では、作動確率が低くなるとおおむね収束時間が長くなった。しかし、単一選択型では、作動確率が低くなると収束時間が長くなるのもあったが、人数が増えると短くなる場合も見られた。とくに、直列転移と逆直列転移、混在した転移で見られた。ほかには、人数が増えると収束時間が長くなるとともに、散布度も大きくなる特徴も見られた(表3)。

3.3.3 非収束、収束状態での心情布置とこれらの予測

すべての条件を通して、収束するか否か、収束した場合にはどのような心情布置になるか、これらの割合を表3に示した。非収束と収束後の非対称性の布置については、先ほど述べた。ここでは、収束後、すべてのダイアドで互報性が成立し、すべてのトライアドが Heider のバランス状態になっている布置について述べる。このとき、問題で述べたように行為者は2つの集合に分かれ、どちらかが空集合のときもある (Cartwright & Harary, 1956)。3人の場合、収束後の心情布置において2つの集合が1:2になることが最も多かった(表3)。4人の場合には1:3で、5人の場合には2:3で、6人の場合には2:4で最も多かった。人数が偶数のとき、2つの集合が同じ大きさとなるのは最も多いということにはなかった。まとめると、集合間に1, 2人の差があるほうが多かった。

非収束、収束した場合の心情布置を、更新方法に加えてソシオメトリーの指標でどのように予測できるかを検討するため、各 N において全条件を通してランダムフォレストで分析を行った。このとき、各 N において全試行の半分をランダムに抽出した推定用データを用いた。残りを交差妥当化用データとした。予測変数を転移の種類、トライアド選択型、作動確率に加え、初期布置における否定的心情の数、非対称性 M 、インバランス度 B といったソシオメトリーの指標とした。インバランス度 B は混在した転移の場合の B を用いた。基準変数を非収束、収束状態での心情布置とした。値は表3にあるように、非収束(NC)と収束状態での非対称性のある布置(A)、行為者集合の分割比(x:y)であった。ソシオメトリー指標に関しては初期布置での分析だけでなく、収束状態、あるいは最終状態より前の心情布置のソシオメトリー指標でどの程度予測できるかを検討するため、収束、あるいは最終状態の1, 2, 4, 8, 16時点前の心情布置におけるソシオメトリーの指標を予測変数として5つ別個の分析も行った。推定用データを用いてランダムフォレストで分析する際、すべての分析を通して変数の選択数は3で、生成した決定木の数は500であった。 t 時点前のソシオメトリー指標を用いた分析では、 t 時点前が存在しない場合にはこの種の試行を分析対象から外した。表3には収束した場合の収束時間の記述統計量も示したが、人数が少ない場合には収束時間が短い試行が多くなり、収束した時点よりも何時点も前の時点が存在しないことも多く、分析に用いた試行数は少なくなった。

交差妥当化による予測的中率を表3に示した。この表でたとえば「-16」となっているのは、収束、あるいは最終状態の16時点前による分析で得られた的中率である。収束、あるいは最終状態に近づけば、的中率があがった。1時点前でも最も高い的中率は5人の場合の95%であり、最も低い中率は4人の場合の80%であった。時点 t が0(初期布置)の場合の予測では、3, 4人の場合には最も割合を占めている1:2と1:3よりも的中率が31%と25%と高く、5, 6人の場合には最も割合を占めている2:3と2:4よりも的中率が13%と16%といくらか高かった。

変数の重要度には mean decrease in accuracy を用いた(表4)。

表3. 非収束、収束後の心情布置の割合、収束時間、およひ的中率

N	非収束、収束後の布置				収束時間			ランダムフォレストによる的中率					
					中央値	25%	75%	初期値	-16	-8	-4	-2	-1
3	NC	A	0:3	1:2	3	1	11	.82	.78	.78	.80	.82	.91
	2%	13%	34%	51%									
4	NC	A	0:4	1:3	12	3	39	.58	.59	.62	.64	.71	.80
	8%	10%	25%	24%									
5	NC	A	0:5	1:4	40	8	213	.59	.67	.70	.76	.87	.95
	8%	0%	21%	24%									
6	NC	A	0:6	1:5	58	8	1659	.50	.54	.58	.66	.76	.83
	9%	0%	19%	16%									

NC 非収束試行, A 収束状態で非対称性のある試行

表4. 非収束、収束後の心情布置を予測する変数の重要度

N	初期布置の場合						収束か最終状態の8時点前の場合					
	転移	選択型	p_1	NEG	M	B	転移	選択型	p_1	NEG	M	B
3	.19	.02	.06	.19	.04	.06	.06	.04	.09	.04	.02	<.01
4	.15	.08	.03	.15	.03	.06	.18	.11	.06	.08	.06	.05
5	.04	.10	.03	.10	.02	.06	.06	.09	.06	.14	.07	.09
6	.06	.12	.02	.11	.02	.05	.07	.11	.03	.14	.06	.08

N 人数, p_1 作動確率, NEG 否定的心情の数, M 非対称性, B インバランス度

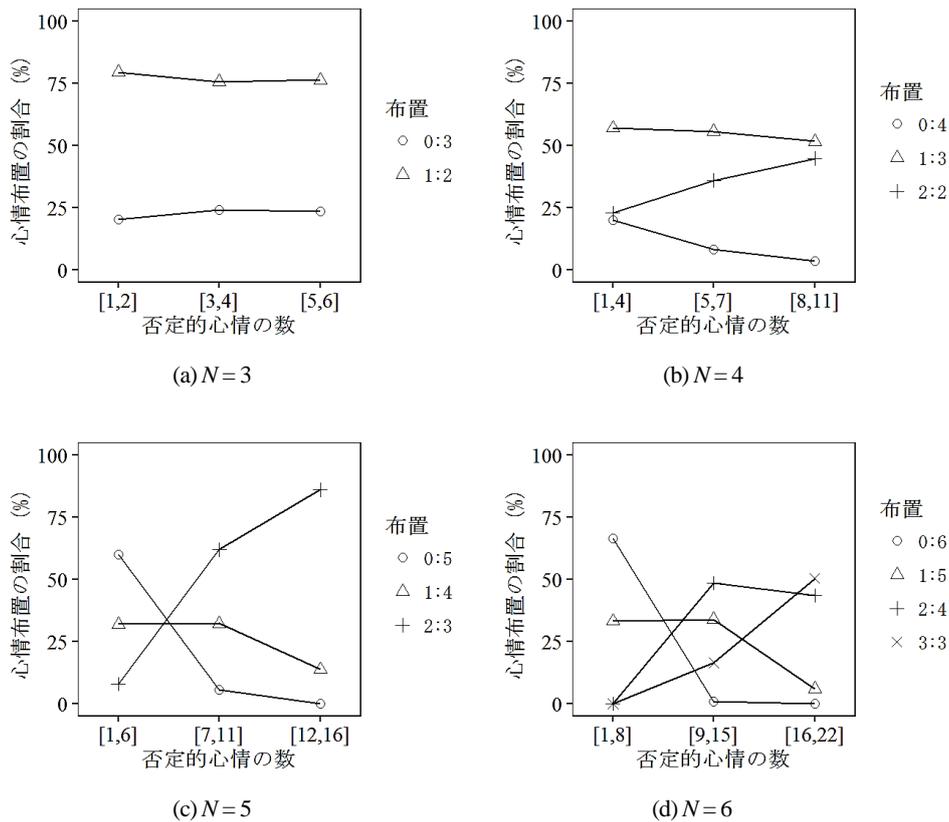


図2. 否定的心情の数と布置の割合
注：混在した転移, $p_1=0.5$, $p_2=0.5$, 8時点前の場合

各布置における変数の重要度には **mean decrease in accuracy** で計算された **class-specific measures** を用いた (付表1)。収束するか否かや、収束状態での心情布置を予測するのに、時点 t が 0 の場合においては、人数に関わりなく否定的心情の数が重要であった。とくに 4 人以上の場合には、この変数はすべての行為者間で肯定的心情を抱くことを予測するために重要であった。また、インバランス度は全体的には重要度が低いものの、すべての行為者間で肯定的心情を抱くことを予測するとき否定的心情の数の次に重要であった。転移は人数に関わりなく収束するか否かを予測するために重要であった。3, 4 人の場合には、収束状態においてダイアドで非対称性が見られるか否かを予測するためにも転移は重要であった。選択型は全体的には 5, 6 人の場合に重要であった。この場合には収束するか否かを予測するために重要であったことに加えて、すべての行為者間で肯定的心情を抱くことを予測するときにもいくらか重要であった。収束するか否かを予測するとき、選択型は 4 人の場合には転移の次に重要であり、3 人の場合には転移と作動確率の次に比較的に重要であった。収束、あるいは最終状態の 8 時点前の場合においては、全体的には 5, 6 人の場合に否定的心情の数が心情布置を予測するために重要であった。3, 4 人の場合では、ほかの変数と比べて否定的心情の数がすべての行為者間で肯定的心情を抱くことを予測するとき重要であった。また、非対称性とインバランス度は 4 人以上の場合に収束するか否かを予測するために転移と選択型の次に重要であった。6 人の場合には非対称性がすべての行為者間で肯定的心情を抱くことを予測するときやや重要となっている。

おおむね、転移や選択型、作動確率は収束するか否かの予測にとって重要であり、否定的心情の数は収束状態でバランス状

態になる心情布置の予測にとって重要であるといえる。また、バランス状態になる心情布置の予測には、変数の重要度の順序から見て選択型や非対称性、インバランス度は補助的であると考えられる。

そこで、心情布置の分割比を予測するために重要な否定的心情の数がどのように関わることかを検討するために、混在した転移、作動確率 $p_1=0.5$ 、選択確率 $p_2=0.5$ で、8 時点前の場合を図 2 に示した。否定的心情の数をできるだけ均等に 3 区分し、心情布置の割合を示した。3 人の場合には異なるが、否定的心情の数が増えると分割の比が等しいか、これに近い布置の割合が大きくなった。孤立の割合は 5, 6 人の場合においては否定的心情の数が多いとき小さくなった。

4. 考察

本研究の目的は、収束するか否か、収束した場合に互報性が成立するか否か、収束時間、収束状態での心情布置の予測について、Heider のバランス原理によるさまざまな更新方法で体系的に検討することであった。第 1 の目的は、収束と互報性に関わることであった。条件によっては収束しない試行も見られた。全選択型において非収束が見られ、単一選択型では、3, 4 人の場合に限られるが、作動確率が 1.0 である同期更新で直列転移だけが働くときのみに見られた。収束してバランス状態になる場合には、逆直列転移だけが働くととき以外では、ネットワーク内ですべて互報性が成立していた。逆直列転移だけが働いたときでも 5, 6 人ではネットワーク内ですべて互報性が成立していた。

互報性原理が働かなくとも、Heider のバランス原理が働くだ

けでネットワーク内のすべてのダイアドで互報性が成立することは、先行研究ですでに示されているが(藤澤・水谷・小杉, 2003; Mizutani, 2004; 水谷, 2004; 水谷, 2015; 水谷・小杉・藤澤, 2002; Nomura, 2004), 本研究ではどのような条件で生じるかを明らかにした。ただし、先行研究でも部分的に条件が明らかになっている。水谷(2004)は3人で、水谷(2015)は4人以上でも逆直列転移のみが働くときには互報性が成立しない場合があることを示している。水谷(2015)はMizutani(2004)を包括して、3人から14人の場合で、連続値モデルにおいて、4種類の転移のそれぞれ1つのみと、混在した転移が働いたときのシミュレーションを行っている。今回の2値モデルによる結果と同様に、ネットワークにおいて並列転移、直列転移、逆並列転移のうちいずれかのみが働くときと、混在する転移が働くとき、ネットワーク内のすべてのダイアドで互報性が成立することを示している。ネットワークにおいて逆直列転移のみが働くときには、5人以下では互報性が成立していない試行も見られた。今回の2値モデルによる結果では5人でもすべての試行においてすべてのダイアドで互報性が成立しているが、連続値モデルによる先行研究の結果では6人以上ですべての試行においてすべての互報性が成立しているという違いがある。

以上の先行研究は、共通する点には、推移性の伴ったトライアドで Heider のバランス原理のみが働いたとき、互報性が導き出されることを示している。ただし、逆直列転移のように推移性の伴っていないトライアドのみでバランス原理が働いても、6人以上(本研究では5人以上)の場合にはすべてのダイアドで互報性が成立することを水谷(2015)と本研究は示している。そのため、バランス原理から互報性を導くためには、推移性の伴ったトライアドでバランス原理が働くことが必要条件だという訳ではない。また、直列転移は推移性の伴ったトライアドで生じる転移だが、トライアド選択型が単一選択型であっても、作動確率が1.0のときには3,4人の場合には収束しない試行がかなりの割合で見られた。そのため、推移性の伴ったトライアドで Heider のバランス原理が働いたときにネットワーク内のすべてのダイアドで互報性が導き出せるのは、条件付きであると言える。

収束時間は人数が増えるごとに長くなることは、すでに先行研究(Mizutani, 2004; Nomura, 2004)で明らかになっていた。しかし、Mizutani(2004)では収束時間が長くなる幅は人数が増えるごとに徐々に小さくなり、Nomura(2004)では収束時間が長くなる幅は人数が増えるごとに大きくなった。両研究のモデルを構成する条件がいくつも異なっていたため、この違いの原因は何か特定できなかつたが、原因は本研究の結果からトライアド選択型だと考えられる。本研究は、単一選択型だと人数が増えるごとに収束時間が長くなる幅が大きくなることを示している。

第2の目的は、収束・非収束、収束後の心情布置をバランス原理による更新方法とソシオメトリーの指標で予測できるか、予測に重要な特徴を検討することであった。的中率は収束、あるいは最終状態に近づくにつれ高くなることを確認したが、これは自然な結果であると考えられる。収束か非収束について予測するためには、主に転移と選択型、作動確率が重要であった。また、とくに収束、あるいは最終状態から8時点前では、非対称性やインバランス度もいくらか重要であった。バランス状態での心情布置の違いを予測するためには、とくに否定的の心情の数が重要であった。この結果から、Wang & Thorngate(2003)が収束後のバランス状態の心情布置の違いを予測するのに否定的の心情の数のみに着目したのは意義があったといえる。また、彼らが焦点を当てなかつた非対

称性やインバランス度は、本研究の結果からは収束・非収束、収束後の心情布置を予測するには補助的に有用な程度であろう。ただし、水谷(2015)の連続値のシミュレーションでは、予測の精度を高める点では、非対称性やインバランス度は否定的の心情の数と同じくらい重要であったという違いがある。また、人間関係においていじめを引き起こしやすい孤立の状態に焦点を当てると、本研究の結果は、5,6人の場合に明確に表れるが、収束前に否定的の心情の数が多ければ、孤立は生じにくいことを示している。代わりに同程度の大きさの2つの対立する派閥が生じやすい。

本研究では、ハイダーのバランス原理のみによる相互作用の観点から、人間関係の動的過程を分析した。ここで得られた結果は、さまざまな要因が関与する現実場面での人間関係について考察するための基礎的な手がかりとなる。

引用文献

- 雨宮 俊彦(2001). 相互作用で解く心と社会——複雑系・ソシオン・視覚記号—— 関西大学出版部。
- Cacioppo, J. T., & Petty, R. E. (1981). Effects of extent of thought on the pleasantness ratings of p-o-x triads: Evidence for three judgmental tendencies in evaluating social situations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 40, 1000-1009.
- Cartwright, D., & Harary, F. (1956). Structural balance: A generalization of Heider's theory. *Psychological Review*, 63, 277-293.
- 藤澤 等(1997). ソシオン理論のコア——心と社会のネットワーク—— 北大路書房。
- 藤澤 等・雨宮 俊彦・木村 洋二(1991). ソシオンの理論2——ダイアドからトライアドへ—— 関西大学社会学部紀要, 22, 165-221.
- 藤澤 隆史・水谷 聡秀・小杉 考司(2003). 計算論的ソシオンモデルのシミュレーション(2)——トライアドの転移オペレーションと荷重バランスの検討—— 関西大学大学院人間科学, 58, 133-147.
- Heider, F. (1946). Attitudes and cognitive organization. *The Journal of Psychology*, 21, 107-112.
- Heider, F. (1958). *The psychology of interpersonal relations*. New York: John Wiley & Sons. (大橋 正夫(訳) (1978). 対人関係の心理学 誠信書房)
- Hunter, J. E. (1978). Dynamic sociometry. *The Journal of Mathematical Sociology*, 6, 87-138.
- Jordan, N. (1953). Behavioral forces that are a function of attitudes and of cognitive organization. *Human Relations*, 6, 273-287.
- Kuřakowski, K., Gawroński, P., & Gronek, P. (2005). The Heider balance: A continuous approach. *International Journal of Modern Physics, C*, 16, 707-716.
- Mizutani, S. (2004). Computer simulations of relations between three or more persons based on a balance theory. *Abstract Book on 28th International Congress of Psychology* (Beijing, China), 1372.
- 水谷 聡秀(2004). ソシオン理論における三者関係のシミュレーション 日本心理学会第68回大会シンポジウム発表資料。
- 水谷 聡秀(2006). 二者と三者の対人関係における心情変化の調査——対称化と pox モデルによる転移からの影響—— 関西大学大学院人間科学, 65, 121-137.
- 水谷 聡秀(2015). ハイダーのバランス原理による相互作用の分析——収束状態における心情布置に与える初期布置や互報性原理の影響—— 日本グループ・ダイナミクス学会第

62 回大会論文集, 110-111.

水谷 聡秀 (2016). ハイダーのバランス原理による相互作用での時系列変化 ——インバランス度と非対称性について—— 電子情報通信学会技術研究報告 HCS, *116* (185), 103-108.

水谷 聡秀・小杉 考司・藤澤 隆史 (2002). 計算論的ソシオンモデルのシミュレーション——二者関係と三者関係による好悪荷重の変化—— 関西大学大学院人間科学, *57*, 109-132.

Morrisette, J. O. (1958). An experimental study of the theory of structural balance. *Human Relations*, *11*, 239-254.

Nomura, T. (2004). Analysis and simulation of group dynamics based on Heider's balance theory and a finite Markov chain. *Proceedings*

of the 2nd International Conference of the European Social Simulation Association (Valladolid, Spain).

奥田 秀宇 (1995). ハイダーの均衡・不均衡状況における感情と認知 社会心理学研究, *11*, 30-38.

Price, K. O., Harburg, E., & Newcomb, T. M. (1966). Psychological balance in situations of negative interpersonal attitudes. *Journal of Personality and Social Psychology*, *3*, 265-270.

Wang, Z., & Thorngate, W. (2003). Sentiment and social mitosis: Implications of Heider's balance theory. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*. Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/3/2.html>

付表 1. ランダムフォレストによる各布置における変数の重要度

N	布置	初期布置の場合						収束か最終状態の8時点前の場合					
		転移	選択型	p_1	NEG	M	B	転移	選択型	p_1	NEG	M	B
3	0:3	<.01	.02	.05	<u>.33</u>	.04	.10	<.01	<.01	.05	.08	.01	<.01
	1:2	<u>.15</u>	.02	.05	<u>.12</u>	.01	<.01	.02	.02	.04	.03	<.01	<.01
	A	<u>.77</u>	.02	.02	<u>.12</u>	<u>.13</u>	<u>.14</u>	<u>.72</u>	<.01	.08	.02	<.01	<.01
	NC	<u>.77</u>	<u>.29</u>	<u>.72</u>	<u>.18</u>	<u>.23</u>	<u>.16</u>	<u>.62</u>	<u>.38</u>	<u>.83</u>	.05	<u>.21</u>	<.01
4	0:4	.01	.07	.04	<u>.39</u>	.05	<u>.13</u>	.04	<.01	<u>.14</u>	<u>.32</u>	.04	.04
	1:3	.10	.04	.02	.07	.03	.05	.07	.03	.04	.04	.02	.03
	2:2	.05	.03	<.01	.03	<.01	<.01	.05	<.01	.03	.07	<.01	.01
	A	<u>.62</u>	.10	<.01	.07	.07	.09	<u>.69</u>	<u>.15</u>	.02	.02	.04	.04
	NC	<u>.42</u>	<u>.38</u>	<u>.11</u>	<u>.12</u>	.09	<u>.12</u>	<u>.48</u>	<u>.65</u>	<u>.18</u>	.07	<u>.31</u>	<u>.24</u>
5	0:5	<.01	<u>.11</u>	.07	<u>.34</u>	.06	<u>.20</u>	.01	.02	.07	<u>.43</u>	.05	.06
	1:4	<.01	.02	<.01	<.01	<.01	<.01	<.01	<.01	.03	<u>.13</u>	.02	.06
	2:3	.02	.07	.02	.06	.03	.03	<.01	.02	.04	<u>.12</u>	.02	.05
	NC	<u>.31</u>	<u>.44</u>	.07	.07	.05	.08	<u>.51</u>	<u>.71</u>	<u>.23</u>	.07	<u>.49</u>	<u>.40</u>
6	0:6	.01	<u>.16</u>	.07	<u>.39</u>	.09	<u>.18</u>	.01	.02	.08	<u>.63</u>	<u>.11</u>	.05
	1:5	.02	.02	<.01	.01	<.01	<.01	<.01	.02	.04	<u>.21</u>	.03	.08
	2:4	.03	.06	<.01	.04	<.01	.03	<.01	.04	.03	.09	.04	.07
	3:3	.02	.05	<.01	.02	<.01	<.01	.02	.02	.01	<u>.12</u>	.01	.05
	NC	<u>.49</u>	<u>.55</u>	.03	<u>.17</u>	.08	<u>.12</u>	<u>.56</u>	<u>.74</u>	.05	.03	<u>.23</u>	<u>.22</u>

N 人数, p_1 作動確率, NEG 否定的心情の数, M 非対称性, B インバランス度

下線は0.10以上の箇所