

他者の観測が不完全な状況下での合意形成ダイナミクス

藤江遼*

*神奈川大学工学部

1. はじめに

合意形成は、複数人の意見を相互作用を通して一致させることである。その過程は、ミクロな相互作用からマクロな構造が発生する現象として、統計物理学者の関心を集め、多くのモデルが提案されている[1]。それらの抽象化されたモデルの適用範囲は、意見形成のみならず、情報の共有・伝播、言語淘汰の問題、市場の独占・寡占など多岐にわたる。一方、災害時などの他者情報の共有が不十分な状況下での合意形成は、重要な問題であるにも関わらず、十分な理解に至っていない。本研究では、そのような他者の観測が不完全な状況下において、誰の意見が最終的な合意に反映されやすいか、単純な数理モデルを用いて考察する。特に、知人関係などの社会的な関係の情報のみを扱う。つまり、各個人は社会的ネットワーク上での位置だけで特徴づけられており、それ以外の属性（地位など）には差のない均質な社会を考える。

2. 方法

これまでに提案されてきた多くの合意形成モデルでは、自己の状態（e.g. 意見）は他者の状態を参照して決定される。しかし他者の意見は必ずしも観測可能ではなく、推測されることも多い。本研究では、他者の状態の推測が合意形成過程に与える影響を明らかにするために、ネットワーク上の Voter model を拡張し観測可能なノード集合と参照可能なノード集合が異なる場合を扱う。

本研究のモデルとして、 N 個のノードで構成される方向のないリンクで接続されたネットワークを考える。各ノードは2つの状態（意見） $\{0,1\}$ のどちらかを持ち、相互作用を通して自己の状態を以下のルールで更新する。

あるノードが状態を選択する際に、そのノードから m_o 次近接までのノードを観測可能、 m_r 次近接までのノードを参照可能とする ($m_o \leq m_r$)。参照可能なノード集合からノードの一つを選び、そのノードが観測可能であればその状態をコピーする。観測可能でないノード ($m_o < m \leq m_r$) の場合は、 $m\{1$ 次近接のノードの情報から推測した状態をコピーする。具体的には、 m 次近接のノードの推測された状態として、接続する $m\{1$ 次近接の状態の重ね合わせを用いる。

3. 結果

一般に Voter model では、すべてのノードの意見が揃ったコンセンサス（すべて1、または、すべて0）状態のみが吸着固定点となる。Voter model を拡張した本モデルにおいても同様である。そのため、ある初期配置が与えられた時の固定確率（最終的にすべて1のコンセンサス状態になる確率）が計算可能となり、今回の解析の対象とする。

理論解析の結果、 $m_o=1$, $m_r=N$ のとき、各ノードの状態 $\hat{\sigma}_i$ の重み付き和

$$\mathcal{H}(\{\sigma_i\}) = \sum_i f_i \sigma_i$$

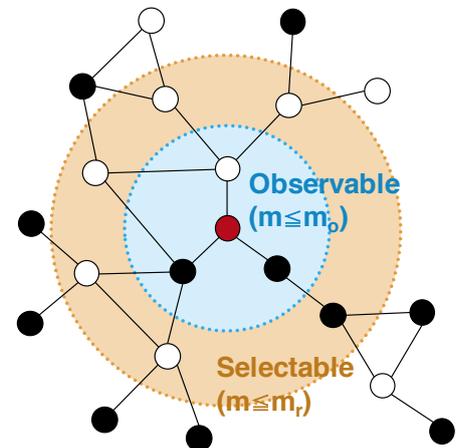


図 1 モデルの模式図.

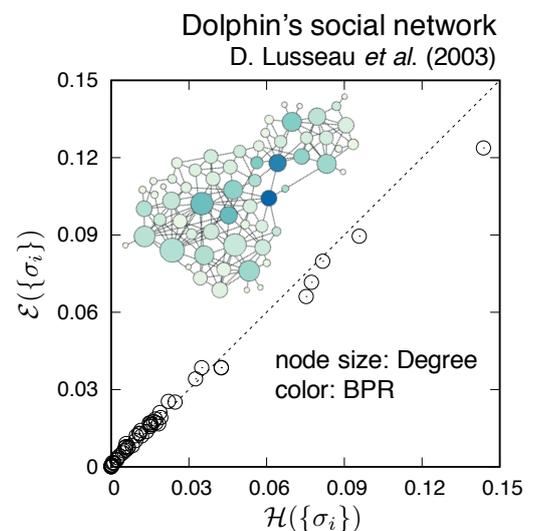


図 2 固定確率 $\varepsilon(\{\sigma_i\})$ と保存量 $\mathcal{H}(\{\sigma_i\})$ の関係.

が保存することを解析的に示した。ここで重み f_i は

$$f_i = \frac{1}{N} \sum_k A_{ik} f_k \sum_j \frac{g_{kj}(i)}{g_{kj}}$$

であり、媒介性の高いノードを媒介するほど大きくなる性質から **Betweenness PageRank (BPR)** と呼ぶ。 g_{kj} はノード k からノード j までの最短経路数、 $g_{kj}(i)$ はノード k からノード j までの最短経路のうちノード i を経由する経路数、 A はネットワークの隣接行列を表す。この保存量 $\mathcal{H}(\{\sigma_i\})$ が固定確率と一致することを解析的に示し、数値計算によって確認した (図 2)。これは、最終的なコンセンサスにおいて、BPR の高いノードの意見が反映される確率が高い (BPR に比例する確率となる) ことを意味する。この結果は、2 種の状態だけをとりうる系だけでなく、 $M(\geq 2)$ 種の状態が存在する多種系にも適応できる。

4. 考察

本研究では、他者の状態推測がある状況下 ($m_o=1, m_r=N$) では、媒介性 (BPR) の高いノードの意見が反映されやすいことを示した。一方、 $m_o=m_r=N$ のとき、本モデルはネットワーク構造を考慮しない **Voter model** に帰着し、保存量は初期における各状態の割合となることが容易に分かる。つまりどのノードの状態も $1/N$ の確率で最終的なコンセンサスの意見になりうる。さらに、従来の推測のないネットワーク上の **Voter model** (本モデルの $m_o=m_r=1$ に対応) では、保存量が各ノード状態の次数による加重和 $\mathcal{H}(\{\sigma_i\}) \propto \sum_i k_i \sigma_i$ となり、各ノードの固定確率は次数に比例することが知られている [2, 3]。つまり推測がない場合、ハブの意見が反映されやすい。これらのことから、他者の推測が行われることにより、合意形成に重要なノードがハブから高 BPR ノード (媒介性の高いノード) にシフトすることが本研究により明らかになった。

今後の課題としては、まず任意の観測可能範囲 (m_o)、参照可能範囲 (m_r) における保存量を見出し、 m_o, m_r 依存性について明らかにすることが挙げられる。次に、**Voter model** 以外の合意形成過程 (e.g. **Majority rule model, Sznajd model, Cultural dynamics, Naming game**) における他者推測の影響を調べ、本研究の結果がモデルに対してロバストであるか検証する必要がある。さらに、ネットワーク上以外の合意形成の場合 (空間配置された集団, 属性ラベリングされた集団) においても、本解析によって他者推測の影響を調べることができる。

本成果の応用可能性として、災害時の情報共有がまず考えられる。災害時には情報のブロードキャストが難しい場合が多く、人づてに情報を広め共有することが必要になる。本成果は、そのような状況下において誰に情報を伝達することで効率的な情報共有が可能になるかについての示唆を与える。次に、ステークホルダーの代表選出において新しい選定方法を提案することができる。本研究で副次的に得られた BPR は、ネットワークにおけるノードの媒介性を表す新しいノード特徴量である。このような社会的ネットワークの特徴量を用いて、多様な意見を持つステークホルダーのクラスタ内から代表を選出することで、より効率的な対話や合意形成が可能になると考えられる。

5. 謝辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS201633 の助成を受けたものです。富山県立大学の中村秀規氏、中京大学の上野ふき氏、中部大学の杉田暁氏には研究の応用可能性などについて議論、ご助言いただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献・データ

1. C. Castellano, S. Fortunato, and V. Loreto, *Rev. Mod. Phys.* 81, 591 (2009).
2. V. Sood and S. Redner, *Phys. Rev. Lett.*, 178701 (2005).
3. V. Sood, T. Antal, and S. Redner, *Phys. Rev. E* 77, 041121 (2008).