ネットワーク構造を入れたオピニオンダイナミクスによる情報の伝播

安部大河,石井晃

鳥取大学工学部

1. 緒言

近年、情報通信技術の発達等が起因となり,自身の考えを他者に伝達することが容易になっている.そこで,集団における意見の変動を予測,もしくは分析することの重要性も大きくなってきている.これらの分野はオピニオンダイナミクスとして知られており,昔から様々な研究がなされている[1,2,3,4,5,6].この理論の代表的なものに Bound Confidence Model が挙げられる.ただし Bound Confidence Model は合意形成の理論であるため,無関心から賛成までの状態を 0 から 1 までで表現するのみであり,反対意見までは考慮されていない.この理論を発展させ, 人々が反発する要素 やマスメディアの影響などを含める形で拡張し,欠点を解決した新しい理論が石井,川畑によって提案されている [7,8].

また,近年 SNS 上において間違った情報などが拡散し,SNS が人々や社会に好ましくない影響を与えることが問題となってきている.そのため,人々の間で情報がどのように伝わっていくのか,その情報の拡散が人々にどのようなインパクトを与えるのか,研究していく必要がある.本研究の目的としては,意見の反発を考慮した時間依存の意見ダイナミクス理論に,情報の伝播を考慮したモデルの改良を行うことである.

また情報の伝播を考えるうえで人々の社会ネットワークを用いるため,様々なネットワーク構造でのオピニオンダイナミクス理論を計算し検証していくことである.

2. 理論-ネットワーク構造を入れたオピニオンダイナミクス

本研究では石井川畑の式(1)の新しい意見ダイナミクス理論をベースに,新しい情報の伝播を組み合わせる.まず,式(1)の理論を説明する.

$$m_i \frac{dI_i(t)}{dt} = c_i A(t) + \sum_{j=1}^{N} D_{ij}\left(I_j(t) - I_i(t)\right)\varphi\left(I_i(t), I_j(t)\right)L_{ij}$$

$$\varphi\left(I_i(t), I_j(t)\right) = \frac{1}{1 + exp\left(\beta\left|I_i - I_j\right| - b\right)} \quad \cdots(1)$$

この理論では意見は正から負まで連続的とし, 個々の人同士の相互作用は賛同・同調から反発まで様々な相互作用があるとした(各人の意見の値$I_i(t)$の値域は$-\infty \leq I_i(t) \leq +\infty$とし,正の値と負の値がそれぞれある問題に関する賛成と反対に相当するとする.また,人と人との意見交換の際にどのような影響を受けるかを定義する係数Dijは人と人との間の信頼と不信を表すとする.即ち$Dij > 0$であれば,iさんはj さんを信頼していて, Dijの値が大きいほどiさんはj さんから影響を受けやすい, $Dij < 0$であればiさんはj さんに不信感を抱いて, Dijの値が大きいほどiさんはj さんから反発しやすいと考える.また,係数Dij は非対称とし,iさんから見たjさんの信頼・不信とj さんから見たiさんの信頼・不信は異なる数値で,片方が正でもう片方は負というのはあり得るとする). また, 外力の影響を各人がマスメディア等から受ける影響という形で採り入れた($A(t)$を時刻tにおけるメディアからの情報とし,これが人ごとに受け取り方が異なる可能性を考慮して係数c_iを付加する.つまり係数c_iは各人ごとにメディアの受け取り方が異なる効果を含めている.もし係数c_iが正ならばi さんはメディア情報の影響を受けて意見を変更し,逆に係数c_iが負ならば,iさんはメディアからの情報に反発して意見を変更することを意味する).よってこの理論では Bounded Confidence Model の欠点が改良されている.また,この理論は時間発展の微分方程式の形で提出されていて, 意見の分布の時間発展が記述しやすい. ただこの理論は 相手の意見に対する同調も反発も無限に続くと仮定している. 意見交換の初期段階は正確に記述できるが, 最終段階の予測は非現実的な無限大の正と負の意見になってしまう. この欠点 を補う理論の改良が石井によってなされており[8],本研究ではこの改良がなされた理論を用いている.本理論の要素としては, ①遠く隔たった意見には影響されない ②自分とほぼ同じ意見には影響されないという 2 点の修正を加えた仮説によるモデルである(ここで$\varphi(Ii, Ij)$は$|Ii - Ij| = b$付近でスムーズにカットオフが働く関数であり,統計物理学で言うフェルミ分布関数と同じ関数形である.さらに$Ij(t) - Ii(t)$ によって, $Ii(t)$ は自分と同じ意見$Ij(t)$には影響されないという影響が入っている).さらに各人の意志の強さm_iを導入する.意志の強さが大きいほど他者からの影響は受けにくくなる.

また本研究では,意見ダイナミクスを計算するにあたり,行列Dのほかに,人々のつながりを 0 と 1 の行列で表したLij行列を用いる.つまり,iさんからjさんへつながりがない場合$Lij = 0$となりiさんはjさんから影響を受けない.このL行列にネットワーク構造を用いる.今回は完全グラフ,ランダムグラフ,スケールフリーネットワークを用いた計算を行った.

3. 理論-情報の伝搬

本研究で提案する情報伝搬モデルを二つ説明する.一つは普及モデルとした.普及モデルの例として 8 人分のランダムネットワークを例に図 1 に示す.

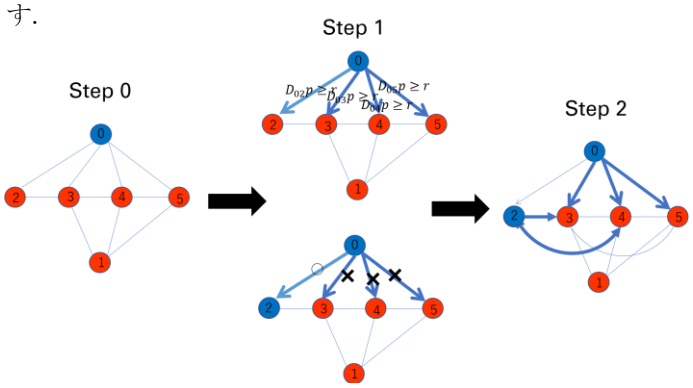

図 1 普及モデル

普及モデルは，ある情報発信者が情報を発信し，受け取った人も同様に情報を発信するようになる，情報の普及を目的としたモデルとした．まず，情報発信者を決め，情報を保有している者と保有していない者をそれぞれラベル付けする．発信者と隣接した情報を保有していないノードを番号順に情報が渡るかどうか，以下に示す(2)式の判別式にかけ、判別する．

$$D_{ij}p \geq r \qquad \cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで，pは任意指定の確率，rは 0 から 1 の乱数とする．情報が渡ったノードは，ラベルを変え，次回以降のステップで発信者と同様の働きをするようになる．ここでは，Dが負の場合，情報は渡らない．図 1 は，$n = 8$のランダムネットワークを例にとった普及モデルの一例を示している．図 1 の step2 以降は step1 と同じ動作を繰り返す動作となる．またここで，渡った情報が人々の意見に影響を与えるようにするため，(1)式の$A(t)$を外部影響$A_{outside}(t)$と書き換え，新たに情報による影響を内部影響とし t $A_{inside}(t)$という項を付け加える．情報が渡った場合のオピニオンダイナミクスは以下の(3)式となる．尚今回は簡単のためc_iは省略する．

$$m\frac{dI_i(t)}{dt} = A_{outside}(t) + A_{inside}(t) + \sum_{j=1}^{N} D_{ij}\left(I_j(t) - I_i(t)\right)\varphi\left(I_i(t), I_j(t)\right)L_{ij} \qquad \cdots\cdots(3)$$

普及モデルでは，情報が渡った段階から，マスメディアからの影響と同じように連続的に情報からの影響を受けるようになる．

もう一つは拡散モデルとした．拡散モデルの例を図 2 に示す．

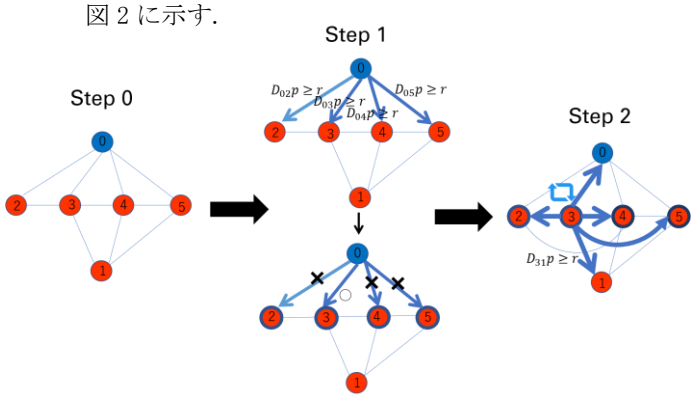

図 2 拡散モデル

拡散モデルは，ツイッターのリツイート機能のように，ある情報発信者が情報を発信し，情報を受けた人がそれを拡散，さらにまたその情報が拡散されていくような、より現実に即したモデルとした． まず，情報発信者を決め，発信者とそれ以外をラベル付けする．次に発信者と隣接したノードを番号順に情報が拡散されるかどうか(2)式の判別式にかける．尚，情報を拡散するしないに関わらず，発信者とつながりのあるノードは，情報を見たとみなし，ノードのラベルを変える．ここではDが負の場合，情報は拡散されないが，情報を見ることはできるとする．そして判別式を通ったノードは隣接ノードに対して情報を発信，拡散する．このとき，次に拡散する可能性のあるノードは情報発信者とすでに情報を見たことのあるノード以外の新規に情報を見るノードだけである．この際，情報を拡散する主体の順番も番号順になっている．図 2 は，図 1 と同じネットワークでの拡散モデルでの一例を示している．また，情報を受け取った場合のオピニオンダイナミクスは普及モデルと同様，(3)式に従うとする．ただし，普及モデルとは違い情報の影響を受けるのは情報発信者から情報を受け取った瞬間の隣接ノードとしている．

4. 計算結果−ネットワーク構造を入れたオピニオンダイナミクス

様々なネットワーク上のオピニオンダイナミクス計算の一例として 100 人のランダムネットワークとスケールフリーネットワークを例に，計算結果を以下に示す．

以下の計算では，同じ条件でのネットワークや初期値はすべて同一のものを用いる．

(1)式の計算を，ネットワークはランダムグラフ，初期意見は−2 から 2 の乱数，信頼度は−1 から 1 の乱数，n=100，a=0，m はすべて 1，計算ステップ 500 回の条件で回した結果を図 3 に示す．図 3 上図は横軸が時間ステップで縦軸が意見の値としている．今回は，初期意見を絶対値 1 を境界に正の意見群，中立の意見群，負の意見群としてそれぞれの色を赤，緑，青として人々の意見の時間推移を表している．このようにグループ分けすることで，集団の意見推移を視覚的に捉えやすくしている． 図 3 下図では計算最終ステップの意見分布を示しており，縦軸は人数，横軸は意見の値としている．それぞれの意見群の人数をそれぞれの色で，水色の棒グラフは合計人数を表している．

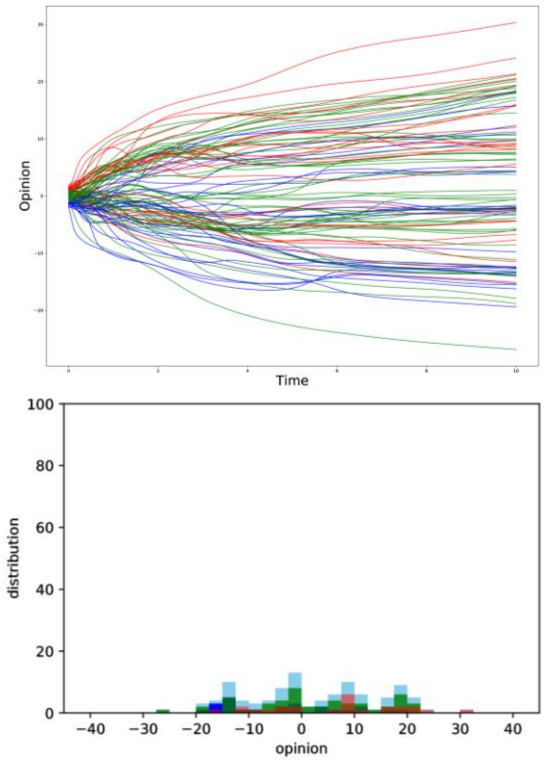

図 3 ランダムグラフの計算

結果,図 3 上図からすべての意見群が全体に分散していく様子が見られ,意見は合意しない.しかし図 3 下図を見ると小さな合意の山が 4 つ連なっているように見える.このように初期値のパラメータをいろいろと変化させ意見の推移を記述していく.

次に, (1)式の計算を,ネットワークはスケールフリーネットワーク,初期意見は-2 から 2 の乱数,信頼度は-1 から 1 の乱数,n=100,a=0,m はすべて 1,計算ステップ 500 回の条件で回した結果を図 4 に示す.今回も同様に初期意見を三つのグループに分けている. ここで,スケールフリーはバラバシアルバートモデルを用いて生成している.

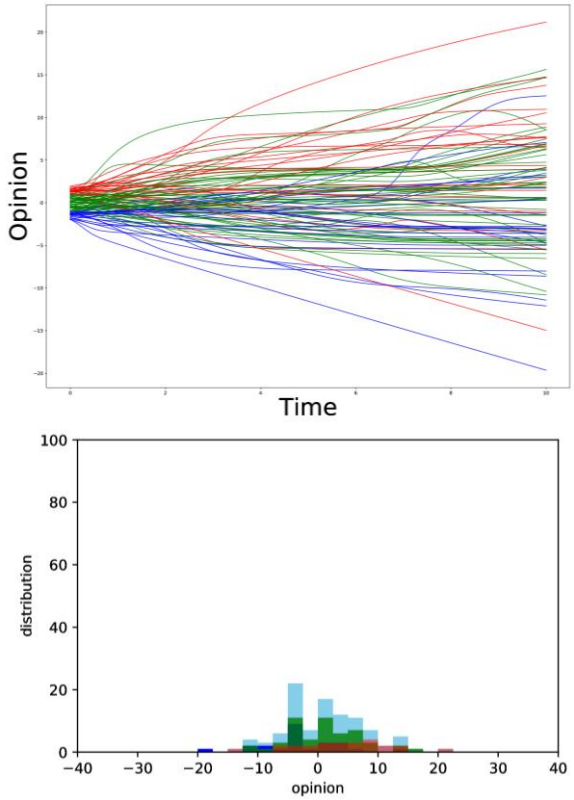

図 4　スケールフリーの計算

結果,図 4 上図はランダムグラフの結果より意見の揺らぎが少ない.これはスケールフリーネットワークが全体的に次数の少ないノードが多いためである.図 4 下図をみると,はっきりとした合意形成ははないがひとつの合意の山ができているのがわかる.

このように,同じ条件で,ネットワーク構造を変えた場合意見の推移や分布は異なった様子を示すため,ネットワーク構造は集団の合意形成に大きく関係しているといえる.

5. 計算結果-情報の伝搬

今回考案した普及モデルを取り組んだ計算を,ネットワークはランダムグラフ,初期意見は-2 から 2 の乱数,信頼度は-1 から 1 の乱数,p=0.001,n=100,a=0,a_in=0,m はすべて 1,計算ステップ 500 回の条件で回した結果を図 5 に示す.横軸が時間ステップで縦軸が意見の値としている. ピンクのグラフが人々の意見の時間推移を表していて,情報が渡った段階で青に変化するようにプログラムしている. 尚,今回情報の伝播の効果を定量的に評価するため、新たな指標を三つ,Speed (1 時間ステップ当たりに情報が渡ったノード数) ,Penetration(情報が渡ったノードの比率),Depth(情報が渡った深さ)と定義した。

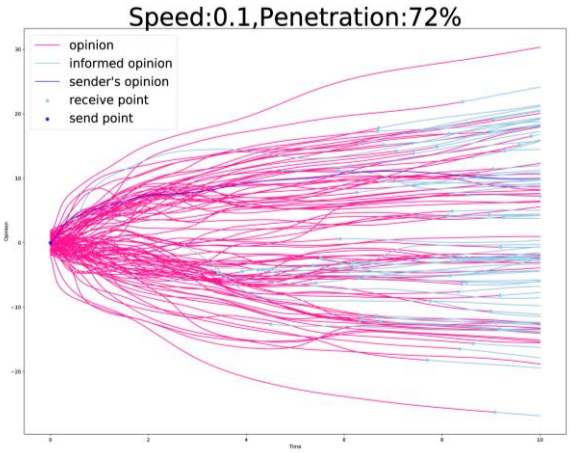

図 5 普及モデルの計算

結果,普及率は 72%,情報の伝わる速さは 0.1 となった.図 5 ではゆっくりと情報が伝わっていく様子が記述できている. 傾向として情報が渡るノードは指数関数的に増加していき指数関数的に収束する.

拡散モデルを取り組んだ計算を,ネットワークはスケールフリーネットワーク,初期意見は-2 から 2 の乱数,信頼度は-1 から 1 の乱数、p=1,n=100,a=0,a_in=0,m はすべて 1,計算ステップ 50 回の条件で回した結果を図 6 に示す. 情報が拡散された瞬間を黒い点の散布図で表している.

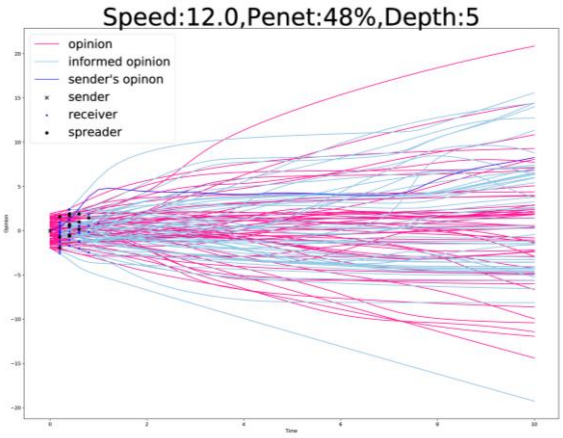

図 6 拡散モデルの計算

図 6 では情報が 4 ステップに渡って拡散する様子が記述できている. 拡散モデルでは普及モデルと違い少ない時間ステップで伝播が終了する.

次に,ネットワークをスケールフリーにした場合に,拡散モデルで情報を発信したとき,発信するネットワーク位置の違いによって,情報がネットワークを伝わる速さに違いがあるかを検証していく.情報発信者を次数の多いハブから,ハブとハブを繋ぐ中継者から,次数が少ないネットワーク周縁者からの 3 地点から選んだ場合の情報の伝わる速さの比較を図 7 に示す.横軸が時間で縦軸が情報が伝わったノード数.それぞれの位置を暖色系,緑色,青色に

している.確率 p=1,信頼度はすべて 1 としているためワンステップで必ず情報が伝わる計算となる.図 7 に示した結果から,周縁者からの場合が最も遅く,続いてハブからが速くなり,そしてわずかに中継者からのほうが速いという結果となった.図 7 は横軸が時間,縦軸が情報が伝わったノード数としている.

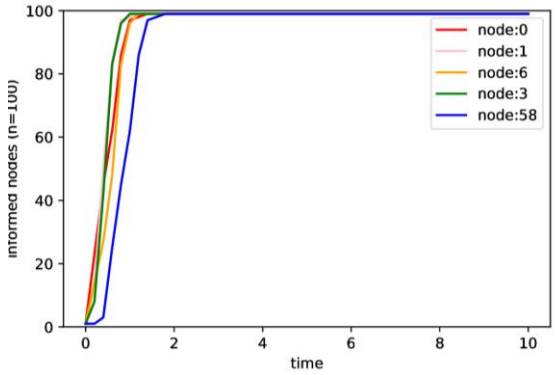

図 7　ネットワーク位置による情報伝搬速度

6.　結論

本研究ではネットワークの種類による意見分布の違いの検証と情報伝達モデルの組み込みを行った.

ネットワーク構造を変化させたオピニオンダイナミクスは,大きく振る舞いが変化することがわかった.

二つの情報モデルを計算した結果,異なる伝播の様子を記述できた.今回は簡単にモデル化した情報の伝播を組み込んだだけであるが,今後は新たな伝搬を模索しモデルの改良を進めていく.

意見ダイナミクスにネットワークと情報伝搬モデルを適用しシミュレートすることで直感的な規則性,例えばハブから情報を伝達するほうが効果的,などを定量的に示すことができた.それと同時に新たな知見を得ることを期待し今後も研究を進めていきたい.

7.参考文献

[1] French J R P (1956) A formal theory of social power.,
Psychological Review 63. pp. 181-194.
[2] Harary F (1959) “A criterion for unanimity in French
’ s theory of social power ”. In Cartwright D (Ed.),
Studies in Social Power. Institute for Social Research,
Ann Arbor.
[3] Abelson, R P (1964), “ Mathematical models of the
dis-tribution of attitudes under controversy”.
In Frederiksen, N and Gulliksen
H (Eds.), Contributions
to Mathemat-ical Psychology, New York, NY: Holt,
Rinehart, and Winston.
[4] De Groot M H (1974) Reaching a consensus. J.
Amer.Statist. Assoc. 69. pp. 118 - 121.
[5] Lehrer K (1975) Social consensus and
rational agnoiology. Synthese 31. pp.
141 - 160.
[6] Chatterjee S (1975) Reaching a consensus: Some limit
theorems. Proc. Int. Statist. Inst. pp.159 -164.
[7] A Ishii and Y Kawahata, “Opinion Dynamics Theory for Analysis of Consensus
71 Formation and Division of Opinion on the Internet ”, Proceedings of The 22nd
Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (IES2018), 71
76; arXiv:1812.11845 [physics.soc-ph]
[8] A.Ishii, ″Opinion dynamics theory considering trust and suspicion in human
Relations ″ Proceeding of 19th International Conference on Group Decision and
Negotiation in 2019 a Joint GDN-EWG/BOR meeting,