テクニカルノート

うわさの伝播モデル

蜷川 繁[†] 津田伸生[†] 服部進実[†]

うわさに代表されるような集団における情報の伝播を調べるために，構成要素間にランダムに張りめぐらされたネットワーク上を情報が伝播する，うわさの伝播モデルを提案し，個人の間の関係と情報の伝播との関係を計算機シミュレーションを用いて調べた結果，各個人が平均して3人に情報を伝達すると，ほぼ集団全体に情報が伝搬することが明らかになった．この結果から，物理的あるいは経済的な制約条件によって構成要素間の接続が限られているようなネットワークで，ほぼ全体に情報を行きわたらせるためには，各構成要素から3本の出力を出し，それをランダムに接続すればよいことが分かる．

An Information Diffusion Model

Shigeru Ninagawa,[†] Nobuo Tsuda[†] and Shimmi Hattori[†]

We propose a model of information diffusion in a community, that is, a network in which the individuals are connected at random and each individual passes information on to one's acquaintances. We investigate the spread of information with the model when the number of the connections between the individuals varies. The computer simulation reveals that if each individual passes information on to three acquaintances on average, information spreads over almost whole community. The result tells that we can construct a network in which each node connects to other three nodes at random in order to diffuse information almost always in the almost whole network.

1. はじめに

近年，複雑系やマルチエージェントの考えに基づいて，組織行動や社会構造の創発（emergence）など，社会や組織における創発的な現象の研究が進められている[1]．これらの研究は，コンピュータ上に人工社会を構築し，その振舞いを調べるという構成的方法をとる一方で，考え方として，社会あるいは組織を情報処理能力を備えたシステムとしてとらえるという特徴を持つ．一般に情報処理に必要な機能としては情報の伝達，情報の保存，情報の加工があげられるが，本研究では特に情報の伝達機能に着目して，集団におけるうわさの伝播という社会現象を取り上げる[2]．

うわさという現象を情報処理という点からみた場合，情報の伝達機能のみをそなえた構成要素からなるシステムにおける情報処理の過程と考えることができる[☆]．従来，情報の伝播のモデルとしては2次元格子上に配置された構成要素の間で情報が伝達するモデルが用いられてきたが，この場合，同時に情報を伝達できる送信先は隣接要素でかつ最大8個までという制限がつく．しかし，実社会においては集団の構成要素である人間は移動するだけでなく，情報化社会においては地理的な関係は重要ではないことから，このようなモデルはうわさの伝播を解析する場合，適切とはいえないであろう．

そこで本研究では，うわさの伝播のモデルとして，構成要素の間にランダムに張りめぐらされたネットワーク上を情報が伝播するモデルを提案する．この場合，構成要素の間をつなぐ線が個人と個人の間におけるうわさを話す人間関係を表しており，このようなシステムでは情報の伝達先は8個までという制限は受けない．このモデルにおいて，最初に1つの構成要素に情報をあたえた場合に，情報が集団内でどの程度ひろがるのかを計算機シミュレーションを用いた確率的

† 金沢工業大学情報工学科
Division of Information and Computer Science, Kanazawa Institute of Technology

☆ 本来，うわさには情報の伝達だけでなく情報の加工という処理も含まれているが，ここでは伝達機能のみを取り上げる．

な手法によって調べる．特に，個人間のうわさを話す関係の度合いと情報の伝播の度合いとの関係に着目する．本研究で考察の対象とするうわさの伝播モデルは社会が持つ情報処理能力のうち，情報の伝達のみに限定した最も単純な人工社会と考えることができる．

2. うわさの伝播モデルの構成

うわさの伝播という観点からみた場合，集団における個人対個人の人間関係を，うわさを話す，または話さないという 2 種類の人間関係に分けることができる．そこで N 人から成る集団において，個人を頂点で表し，各頂点に $1, 2, \cdots, N$ の番号をつける．個人 i が個人 j にうわさを話す場合を頂点 i から頂点 j への弧 (i, j) として表現する．ただし，各個人にとって自分自身はうわさを話す対象とはなりえないことから，ループすなわち同一の頂点を結ぶ弧は存在しないものとする．こうして集団におけるうわさを話す人間関係をループのない有向グラフとして表現することができる．各頂点は 0 または 1 のいずれかの状態をとる．状態 0 はその頂点に情報が伝わっていないことを意味し，状態 1 は情報が伝わっていることを意味している．本研究で考察するモデルでは弧はランダムに生成する．したがって，各頂点からの出次数は異なっており，これはうわさをよく話す人物やあまり話さない人物がいることを表している．また，弧 (i, j) が存在しても，弧 (j, i) が存在するとは限らない．これは現実の集団においてもありうる状況であると思われる．**図 1** に，$N = 5$ の場合のうわさの伝播モデルの例を示す．この例では頂点 1 にとって頂点 2 および頂点 5 はうわさを話す関係にあることを示している．

うわさの伝播モデルは離散時間で変化するものとし，ステップが進むにつれ次のように変化する．

(1) ステップ 0 で，無作為に選んだ頂点（たとえば頂点 i とする）の状態を 1 とし，それ以外の頂点の状態を 0 とする．これは，人物 i がうわさの発生源となることを表している．

(2) 次のステップで，頂点 i から隣接しているすべての頂点，すなわち頂点 i から出るすべての弧の終点の状態を 1 にする．これは人物 i が自分の知人にうわさを話すことに相当する．

(3) 以降のステップでは，状態が 1 の頂点から隣接するすべての頂点の状態を 1 にするという動作を繰り返す．これはうわさを聞いた知人がさらにそれぞれの知人にうわさを伝える行動に相当する．

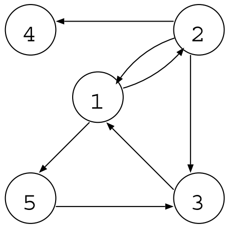

図 1 うわさの伝播モデルの有向グラフによる表現．頂点の数字は頂点の番号を表す
Fig. 1 Digraph of the proposed information diffusion model.

このように，うわさの伝播モデルは各頂点の状態が離散時間で変化するループのない有向グラフとして定義される．

ステップ t における頂点 j の状態を $a_j(t)$ で表し，ステップ t における状態が 1 の頂点の数を伝播数 $D(t)$ とよび，式 (1) で定義する．

$$D(t) = \sum_{i=1}^{N} \theta(a_i(t)),$$
$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0. \end{cases} \tag{1}$$

うわさの伝播モデルではいったん状態が 1 となった頂点は状態 0 に戻ることはないので，明らかに伝播数 $D(t)$ はステップ t に対して非減少関数となる．また，全頂点数 N が有限であることから，伝播数 $D(t)$ はあるステップ T_s 以降は一定値をとる．このとき，ステップ T_s で系は定常状態になったと見なし，その時点でシミュレーションを停止するものとする．

定常状態のときの伝播数 $D(T_s)$ を最終伝播数とよぶことにする．うわさが十分にひろがったと判断される閾値として構成員の 90%以上という値を設定する．すなわち全頂点の 90%以上に情報が伝播した状態（$D(T_s) \geq N * 0.9$）をうわさが十分にひろがった状態と見なし，ここでは「蔓延状態」とよぶことにする．

3. 計算機実験

明らかに，個人の間のうわさを話す人間関係が多いほど，うわさはより多くの個人に伝わることが予想される．そこでうわさの伝播モデルにおいて，個人がどの程度の人間関係でつながっていればうわさが集団のほぼ全体にひろまるのかを調べるために計算機によるシミュレーションを行う．具体的には，N 個の頂点からなる有向グラフにおいて，最大 $N(N-1)$ 個の弧のうち，無作為に選んだ M 個の弧のみを実際に与えた場合に，蔓延状態に到達するかどうかを調べる．

うわさの伝播モデルは決定論的なシステムであり，

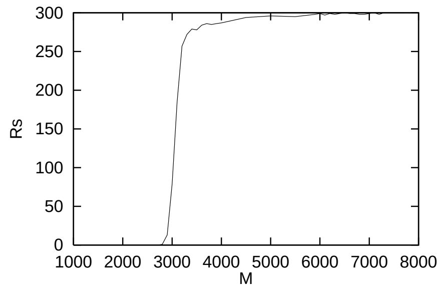

図 2 弧の数 M と蔓延状態になった試行回数 R_s の関係．全試行回数は 300，頂点数 $N=1200$，$\Delta M=100$

Fig. 2 Number of runs R_s in which the model attained the wellspread state out of 300 runs as a function of the number of arcs M. The number of vertices N is 1200, $\Delta M = 100$.

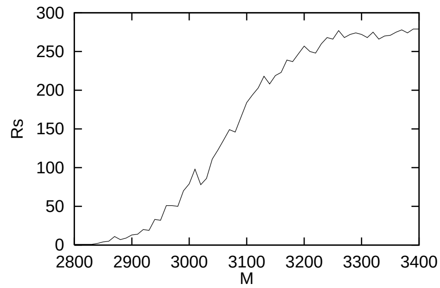

図 3 弧の数 M と蔓延状態になった試行回数 R_s の関係．全試行回数は 300，頂点数 $N=1200$，$\Delta M=10$

Fig. 3 Number of runs R_s in which the model attained the wellspread state out of 300 runs as a function of the number of arcs M. The number of vertices N is 1200, $\Delta M = 10$.

最終伝播数 $D(T_s)$ は弧の結び方と最初に情報をあたえる頂点によって一意的に決まる．しかし，本研究で調べたいのはモデルの個々のシステムの振舞いではなく，多くのモデルの平均的な振舞いである．したがって，個々のモデルではなく，統計力学におけるアンサンブル平均のように，うわさの伝播モデルにおいて弧をランダムに生成したモデルの集合を考え，その集合での集合平均を調べることにする．これはグラフ理論においてランダム有向グラフ（random digraph）として知られている．

頂点の数を $N=1200$ とし，とりうる $1200\times(1200-1)=1438800$ 個の弧のうち，M 個の弧を無作為に選び，300 回試行したうち，蔓延状態になった回数 R_s を測定する．このようなシミュレーションを弧の数 M を 100 ごとに変化させ，測定した結果を**図 2** に示す．シミュレーション回数の 90%以上が蔓延状態になる場合を「拡散相」とよび，90%未満の場合を「非拡散相」とよぶことにする．拡散相においては，ほぼ確実にうわさは集団のほぼ全体にひろまると見なすことができる．図 2 から弧の数 M を大きくするにつれてシステムは非拡散相から拡散相へと移行することが分かる．特に $M=2800$ から $M=3400$ にかけて R_s が急激に増大している．そこで，変化の様子を細かく調べるために，$M=2800$〜3400 の範囲に限って M を 10 ずつ変化させて R_s を測定した結果を**図 3** に示す．図 3 をみると，M が増加するにつれて非拡散相から拡散相へと連続的に転移していることが分かる．

次に頂点数 N を $100, 200, \cdots, 2800$ と 100 ごとに変化させ，それぞれの N について弧の数 M を 100 ごとに変化させた場合に，非拡散相から拡散相に転移する最小の弧の数 M_{min} を求めた．頂点数 N ごとの

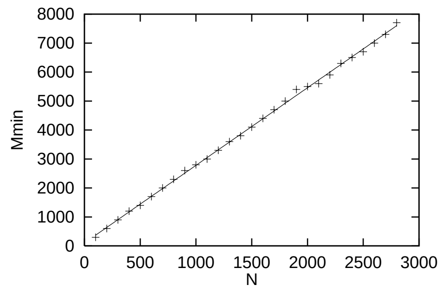

図 4 頂点数 N と非拡散相から拡散相へと転移する最小の弧の数 M_{min} の関係．実線は最小 2 乗法で求めた回帰直線 $M_{min}=2.678N+102.381$

Fig. 4 Minimum number of arcs M_{min} at which the phase transition from non-diffuse phase to diffuse phase occurs as a function of the number of vertices N. The straight line represents the least-square fitting of the data by the linear function $M_{min} = 2.678N + 102.381$.

M_{min} をプロットしたのが**図 4** である．図 4 から頂点数 N と拡散相に転移する最小の弧の数 M_{min} は式 (2) に示すように比例関係にあることが分かる．

$$M_{min} \simeq \alpha N + \beta. \qquad (2)$$

式 (2) の比例定数 α は 1 頂点あたりの平均出次数にほかならない．最小 2 乗法によると $\alpha=2.678$，$\beta=102.381$ となり，求めた回帰直線を図 4 にあわせて示す．すなわち非拡散相から拡散相へと転移する際の 1 頂点あたりの平均の弧の数は全頂点数 N に依存せず，ほぼ 3 であることが分かった．

4. おわりに

本研究では，集団における情報の伝播を調べるためにうわさの伝播モデルを提案し，計算機シミュレーションを行った．その結果，個人の間の人間関係を増やす

につれて蔓延状態になる割合が連続的に増加することが明らかになった．また，各個人が平均して他の3人に情報を伝達すれば系は非拡散相から拡散相になることが示された．この結果は，集団を構成する人物が平均して3人にうわさを伝えると，そのうわさはほぼ全員に伝わることを意味している．

なお，ランダム有向グラフの到達可能性や推移閉包の大きさについては，すでに求められている[3]が，本研究のように，情報が伝播するための平均出次数は今まで求められていない．

うわさの伝播モデルの応用例として，物理的あるいは経済的な制約条件によって構成要素間の接続が限られているようなネットワークを想定してみる．そのようなネットワークにおいて，1つの構成要素が持っている情報をシステムのほぼ全体に伝えたい場合，各構成要素から3本の出力を出し，それをランダムに接続することにより，90%の確率でシステムのほぼ全体（構成要素の90%）に情報に伝えることができる．この場合，出力先をどの構成要素に接続するかについての検討はいっさい不要である．

今回，提案したモデルは集団における情報の伝播のモデルとしては最も単純なモデルだが，今後はより現実に近い複雑なモデル，たとえば伝播するにつれて情報が変化するようなモデル，あるいは情報の質（良いニュースか悪いニュースか?）によって弧が変化するようなモデル，さらには電子掲示板のように各個人が自由に情報を読み書きできる場を共有する集団における情報処理のメカニズムを考察する予定である．また本研究は系の定常状態のみを対象としており，系の過渡状態における振舞いについて今後，研究を進める予定である．

参考文献

1) Epstein, J. and Axtell, R.: *Growing Aritificial Societies*, MIT Press (1996).
2) 川上善朗：うわさが走る 情報伝播の社会心理，サイエンス社 (1997).
3) Uno, Y. and Ibaraki, T.: Reachability Problems of Random Digraphs, *Trans. IEICE*, Vol.E81-A, No.12, pp.2694–2702 (1998).

(平成11年 8 月24日受付)
(平成11年11月 4 日採録)

蜷川　繁（正会員）

1986年金沢大学理学部物理学科卒業．1988年富山大学大学院理学研究科修士課程修了．民間企業を経て，1998年富山大学大学院工学研究科博士後期課程修了．同年，明星大学情報学部助手．1999年金沢工業大学情報工学科講師．博士（工学）．複雑系，人工生命の研究に従事．電子情報通信学会会員．

津田　伸生（正会員）

1971年金沢大学工学部電子工学科卒業．1974年同大学院工学研究科修士課程修了．同年日本電信電話公社（現NTT）電気通信研究所入所．1996〜98年早稲田大学理工総研客員助教授を経て，1998年金沢工業大学情報工学科教授．博士（工学）．フォールトトレラントシステム，マルチメディア情報システムの研究に従事．IEEE，電子情報通信学会各会員．

服部　進実（正会員）

1964年東北大学工学部電子工学科卒業．同年富士通入社．1989年金沢工業大学情報工学科教授．1995年同大人間・情報・経営工学系長．工学博士．本学会北陸支部長，電子情報通信学会通信グループ副委員長を歴任．情報通信システム，分散オブジェクトシステムの研究に従事．電子情報通信学会，人工知能学会，IEEE各会員．