知 能 と 複 雑 系 117－11
(1999. 7. 23)

うわさモデルにおける情報の伝搬について

蜷川 繁　　服部進実

金沢工業大学 情報工学科
〒 921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1
076-248-1100
e-mail:{ninagawa,hattori}@infor.kanazawa-it.ac.jp

あらまし　うわさに代表されるような集団における情報の伝搬を調べるために，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搬する「うわさモデル」を提案し，個人の間の知人関係と情報の伝搬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わかる．

キーワード　人工社会, うわさ, 情報伝搬, うわさモデル

Information Diffusion in Rumor Model

Shigeru NINAGWA　　Shimmi HATTORI

Division of Information and Computer Science, Kanazawa Institute of Technology
7-1 Ohgigaoka,Nonoichi,Ishikawa 921-8501,Japan
+81-76-248-1100
e-mail:{ninagawa,hattori}@infor.kanazawa-it.ac.jp

Abstract　As a model of information diffusion in a community, we propose rumor model, 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 in the rumor 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 obtained in this paper tells that we carr construct a network in which each node merely connects to other three nodes at random in order to diffuse information in the network.

key words　artificial societies, rumor, information diffusion, rumor model

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, 2, 3]. これらの研究は，コンピュータ上に人工社会を構築し，そのふるま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もつ．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搬という社会現象を取り上げる．

うわさの研究は主に社会学，もしくは社会心理学においてなされてきた [4]. それらの分野では，個々のうわさの発生と伝搬に関する事例研究や，広がるうわさの特性あるいはうわさを広げる人間の心理などが研究対象とされてきた．本研究ではうわさを集団における情報処理の観点から研究する．うわさという社会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ムにおける情報処理の過程と考えることができる．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．うわさの伝搬という点から集団における個人対個人の関係をみた場合，うわさを話す関係とうわさを話さない関係という 2 種類の関係に分けることができる．本研究では，集団内の個人の間にうわさを話す関係がどの程度あれば情報が集団全体にひろがるのかを調べる．

従来，情報の伝搬のモデルとしては 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 [5, 6] 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，情報化社会では地理的な関係は重要ではなくなっている．したがって，このようなモデルはうわさの伝搬を解析する場合，適切とはいえないであろう．

node No.	0:他人,1:知人
1	0
2	1
.	.
.	.
j	- (don't care)
.	.
.	.
N	1

表 1: ノード j の知人表

そこで本研究では，うわさの伝搬のモデルとして，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搬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関係を表しており，このようなモデル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て調べる．特に，うわさを話す関係の密度と情報の伝搬の度合いとの関係に着目する．このモデルを「うわさモデル（rumor model）」とよぶことにする．

2 うわさモデルの構成

うわさモデルは N 個の要素から構成され，離散時間で動作するシステムである．本論文では構成要素をノードとよぶことにする．ノードは集団における個人を表している．各ノードには $1, 2, \cdots, N$ の番号がつけられており，j 番目のノードを単にノード j とよぶことにする．ステップ t におけるノード j の状態を $a_j(t)$ とする．各ノードは 0 と 1 のいずれかの状態をとる．状態 0 はそのノード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．

各ノードは「知人表」という表をもつ．知人表

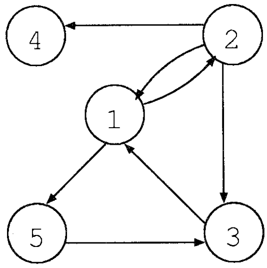

図 1: うわさモデルの有向グラフによる表現．頂点の数字はノードの番号を表す．

node No.	0:他人,1:知人
1	-
2	1
3	0
4	0
5	1

表 2: 図 1.におけるノード 1 の知人表

はそのノードからみた他のノードとの関係（知人または他人）を一覧表にしたものである．たとえばノード j の知人表が表 1 のように与えられているとする．ここで 1 列目はノードの番号を表し，2 列目は 0 または 1 の値をとる．2 列目が 0 であるノードをノード j の「他人」とよび，1 であるノードをノード j の「知人」とよぶことにする．各個人にとって，自分自身は知人や他人という関係にはなりえないので自分自身のノード j のエントリは考えない．知人表はノードごとにランダムに生成するので，一般に各ノードの知人表は異なっている．したがって，知人が多いノードや知人が少ないノードが存在する．また，ノード j がノード k を知人として知人表に登録していても逆にノード k がノード j を知人として登録しているとは限らない．これは現実の社会においてもあり得る状況であると思われる．

各ノードを頂点で表し，ノード j がノード i の知人であることを頂点 i から頂点 j への辺で表すことにより，うわさモデルを有向グラフとして表現することができる．図 1 には有向グラフによるうわさモデルの表現の例を，表 2 にはノード 1 の知人表の例をそれぞれ示す．この例ではノード 1 にとってノード 2 およびノード 5 は知人であり，ノード 3 およびノード 4 は他人である．

うわさモデルは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，無作為に選んだノード（たとえばノード i とする）の状態を 1 とし，それ以外のノードの状態は 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，ノード i は自分の知人表をみて知人として登録されているノードの状態を 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 のノードは各自の知人表をみて知人として登録されているノードの状態を 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．

ステップ t における状態が 1 のノードの数を伝搬数 $D(t)$ とよび，(1) 式で定義する．

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

うわさモデルではいったん状態が 1 となったノードは状態 0 に戻ることはないので，明らかに伝搬数 $D(t)$ はステップ t に対して非減少関数となる．また，全ノード数 N が有限であることから，伝搬数 $D(t)$ はあるステップ T_s 以降は一定値をとる．この時，ステップ T_s で系は定常状態になったとみなし，その時点でうわさモデルは停止する．

うわさモデルの時間発展を有向グラフによって表現した例を図 2 に示す．この図で状態が 0 のノードを白丸で，状態が 1 のノードを黒丸でそれぞれ表している．この例ではノード数は 7 で

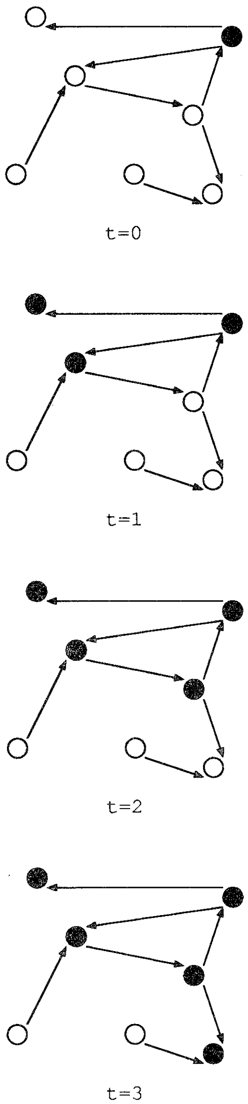

図 2: うわさモデルの時間発展の例．$N=7$ の場合．

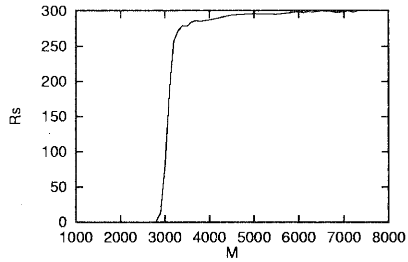

図 3: 知人エントリ数 M と 300 回中，蔓延状態になった回数 R_s の関係．ノード数 $N=1200$.

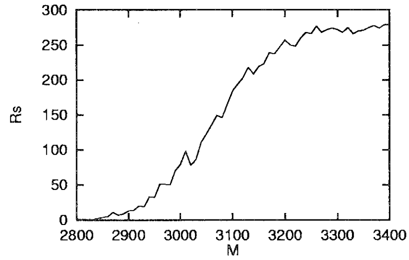

図 4: 知人エントリ数 M と 300 回中，蔓延状態になった回数 R_s の関係．ノード数 $N=1200$.

あり，全ノードの知人表の内，知人として登録されているエントリ数（=辺の総数）は 7 である．ステップ $t=0$ では無作為に選ばれたノードのみが状態が 1 となっている．ステップ $t=1\sim 2$ では情報が伝搬し，ステップ $t=3$ で定常状態になっている．定常状態では 7 個のノードの内，5 個のノードに情報が伝搬している．

定常状態の時の伝搬数 $D(T_s)$ を最終伝搬数とよび，$D(T_s) \geq N * 0.9$ となる時，すなわち全ノードの 90% 以上に情報が伝搬した状態を「蔓延状態」とよぶことにする．

3 計算機実験

図 2 の例からもわかるように，情報はすべてのノードに伝搬するわけではない．一般にうわ

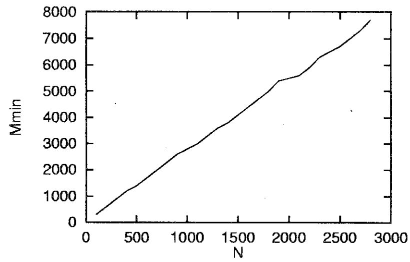

図 5: ノード数 N と非拡散相から拡散相へと転移する最小知人エントリ数 M_{min} の関係.

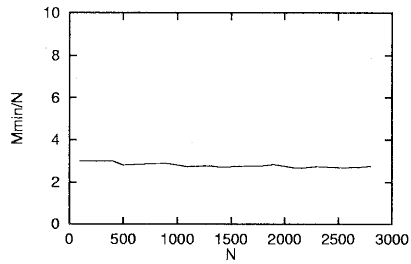

図 6: ノード数 N と 1 ノードあたりの平均知人エントリ数 M_{min}/N の関係.

さモデルでは，知人関係が多いほど情報がより多くのノードに伝わることが予想される．そこでうわさモデルにおいて，ノードがどの程度の知人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．うわさモデルは決定論的なシステムであり，最終伝搬数 $D(T_s)$ はノード間の知人関係と最初に情報をあたえるノードによって決まる．しかし，本研究で調べたいのはうわさモデルの個々のシステムのふるまいではなく，うわさモデルの平均的なふるまいである．したがって，うわさモデルにおける個々のシステムではなく，統計力学におけるアンサンブル平均のように，うわさモデルにおいて知人表をランダムに生成したシステムの集合を考え，その集合での集合平均を調べることにする．

N 個のノードからなるうわさモデルでは全ノードの知人表は $N(N-1)$ 個のエントリをもつ．このなかから無作為に選んだ M 個のエントリを 1 とし，残りのエントリを 0 とする．これは有向グラフにおいて，とり得る $N(N-1)$ 個の辺の内から M 個の辺のみを選ぶことを意味している．M は全ノードの知人表の内，知人として登録されているエントリの数であることから知人エントリ数とよぶことにする．

ノード数 $N = 1200$ とし，毎回，知人表を変えて 300 回実行した内，蔓延状態になった回数 R_s を測定した．このようなシミュレーションを知人エントリ数 M を 100ごとに変化させ，測定した結果を図3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．拡散相においてはうわさは集団のほぼ全体にひろまるとみなすことができる．図 3 から知人エントリ数 M を大きくするにつれて非拡散相から拡散相へと移行することがわかる．特に $M = 2800$ から $M = 3400$ にかけて R_s が急激に増大していることがわかる．そこで，変化の様子を細かく調べるために，$M = 2800 \sim 3400$ の範囲に限って M を 10づつ変化させて R_s を測定した結果を図 4 に示す．図 4 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わかる．

次にノード数 N を $100, 200, \cdots, 2800$ と 100 ごとに変化させ，それぞれの N について知人エントリ数 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知人エントリ数 M_{min} を求めた．ノード数 N ごとの M_{min} をプロットしたのが図 5である．図 5 からノード数 N と最小知人エントリ数 M_{min} は (2) 式に示すように比例関係にあることがわかる．

$$M_{min} = \alpha N. \quad (2)$$

(2) 式の比例定数 α は 1 ノードあたりの平均知人エントリ数にほかならない．そこで定数 α を求めるため，ノード数 N と 1 ノードあたりの平均知人エントリ数 M_{min}/N の関係を図 6 に示

す．図6から N によらず α は 2.66 ~ 3.00 となることがわかる．すなわち非拡散相から拡散相へと転移する際の 1 ノードあたりの平均知人エントリ数は全ノード数 N に依存せず，ほぼ 3 であることがわかった．

4 おわりに

本研究では，集団における情報の伝搬を調べるためにうわさモデルを提案し，計算機シミュレーションによって，各ノードが平均して他の 3 個のノード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．

うわさ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つの構成要素がも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．

本研究で提案したうわさモデルを構成するノードは，知人表に従って情報を伝達するという単純な機能しか備えていないが，今後は集団における意見形成や要素間の協調のように，より複雑なふるまいを示す人工社会を研究する予定である．またうわさモデルにおいて非拡散相から拡散相へと転移する平均知人エントリ数がなぜ 3 になるのかについての理論的な解析もあわせて行う予定である．

参考文献

[1] 佐々木隆師, 生天目章:市場指向計算モデルと複雑系. 情報処理学会研究報告,110-10,98-ICS-110 (1998).

[2] 塩瀬隆之, 岡田美智男, 椹木哲夫, 片井修: 双参照モデルにおける社会性の発現機構. 情報処理学会研究報告,110-11,98-ICS-110 (1998).

[3] 寺野隆雄, 倉橋節也, 南潮: 創発的計算と計算論的組織理論による情報ネットワーク社会モデル. 情報処理学会研究報告,110-12,98-ICS-110 (1998).

[4] 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).

[5] 富田真治, 下山良嗣, 生天目章:情報伝搬のメカニズム. 情報処理学会第 58 回全国大会,3S-5 (1999).

[6] 南俊郎, 大谷武:ロコミ機構のコスト制御法. 情報処理学会研究報告,90-23,98-DPS-90 (1998).