

# 成長するネットワーク上の協調モデル—物理学と社会学の接点

## Cooperative Models on Growing Networks in Physics and Sociology

石川 孝

Takashi Ishikawa

日本工業大学

Nippon Institute of Technology

The research on the cooperative models on growing networks to predict user's coordinative behavior in social software such as SNS and social bookmarking service are on the way. This paper describes a survey on the cooperative models starting from the research by Holme and Newman [Holme 2006] and examines the cooperative models that can be applied to social software..

### 1. はじめに

実世界に見られる複雑ネットワークの主な特徴は、多くのハブをもつ結合の歪んだ分布、強い不均質性と高いクラスタ性、および自明でない時間発展である[Dorogovtsev 2008]. 時間発展については、ソーシャルネットワークキングサイト(SNS)におけるグループ形成[松尾 2007]などを解析するための、成長するネットワーク上の協調モデルの研究がまだ研究途上にある。Holme と Newman [Holme 2006]は、成長するネットワークと、その上で相互作用するエージェント群とが互いに強く影響し合う状況を解析した。彼らが扱った問題は、実世界のソーシャルネットワークが似通った個人のグループやコミュニティに分かれる傾向を示す意見形成のダイナミクスである。彼らは、意見ダイナミクスと近親性ネットワークの形成とを結合する単純なモデルによって、この結合パラメータについてクラスタサイズに相転移が起こることを示した。本論文は、この研究を 1 つの出発点とする成長するネットワーク上の協調モデルについてサーベイし、ソーシャルソフトウェアに適用できる協調モデル[石川 2009]について検討する。

本論文はつぎのように構成されている。2 章は、まずモデル化の対象である SNS のダイナミクスについて述べる。3 章はネットワークのトポロジーと各ノードの状態との間にフィードバックループが存在する適応的ネットワークについて紹介し、4 章は適応的ネットワークにおけるグループ形成モデルについて述べる。5 章は協調モデルの構築の基礎である同調と選択のモデル化について、また 6 章はソーシャルダイナミクスのモデル化について検討する。そして 7 章は協調モデルにおける物理学と社会学の接点について述べ、最後に 8 章で検討結果のまとめと今後の課題を述べる。

### 2. SNS のダイナミクス

#### 2.1 SNS とは

ソーシャルネットワークキングサイト(Social Networking Site; SNS)は、個人が(1)限定されたシステム内で公開または準公開のプロフィールを作成し、(2)その個人が関わりをもつ他のユーザを区別し、(3)システム内でのユーザの関わりを他のユーザが知ることができる Web ベースのサービスである[Boyd 2007]. ここで個人の関わりはサイトによってさまざまな意味付けをもつ。SNS の際立った特徴は、ユーザのソーシャルネットワークを区別して見せることである。これによって他の手段ではできない個人の間の関わり

が作られる。ユーザが関わりをもつ他のユーザ(システム内の“友人”)は、ユーザのプロフィールページに表示される。ユーザが SNS に参加すると、システム内の関わりをもつ他のユーザを識別するように求められる。多くの SNS はこの関わりに双方向の承諾を必要とするが、必要としないサイトもある。

#### 2.2 mixi のデータ分析

日本で最もユーザ数の多い SNS はおそらく mixi(ミクシイ)であり、2006 年 10 月にはユーザ数が 600 万人を超えている。mixi では、自分の日記や写真、本のレビューなどを“友人”の範囲内で公開することができ、さらにコミュニティと呼ばれるグループ内の掲示板を利用して、特定のトピックに関する情報をやりとりする。そして、ユーザが次々に新しいユーザを招待することでユーザが連鎖的に増えていく。松尾と安田[松尾 2007]は、2005 年 3 月時点の mixi のデータ分析を行い、つぎのような特性を明らかにした。

##### (1) 友人関係の構造

mixi での“友人”関係(マイミクと呼ばれる)は相互承認を必要とし、以下ではこの関係を単に友人関係と記す。まず、mixi の友人関係ネットワークはスケールフリー性をもち(べき乗の指数は 2.4 程度)、最大コンポーネントに約 99%のユーザが含まれている。最大コンポーネントの平均パス長は約 5.5 であり、スモールワールド性が見られる。

##### (2) コミュニティの構造

mixi のコミュニティは、ユーザが自由に開設でき、誰でも参加可能なものと、コミュニティの管理者の承諾が必要なものがある。多数のユーザの関心を集めたコミュニティは拡大し、また類似した関心をもつユーザは共通のコミュニティに集まる。各ユーザの所属コミュニティ数の平均は約 25 であり、各コミュニティのメンバー数の平均は約 66 人である。メンバー数が 1,000 人を超えるものは全体の約 8%であり、Zip 則は見られない。

##### (3) 友人関係とコミュニティ

コミュニティの共通所属は友人関係の契機になりうると同時に、コミュニティ相互の関連性を形成する。コミュニティは、実生活の友人関係に支えられたコミュニティから、純粋に関心だけでつながった友人関係まで幅広く存在する。情報収集という観点からは友人関係がなくても十分に機能を果たしている場合もある。

##### (4) コミュニティの時間発展

人気のコミュニティは、常に多くの参加を呼び、時間とともに大きくなる。そして、大きなコミュニティが徐々に具体的、マニアック

な特化されたコミュニティを生み出す。一方で、友人関係をきっかけとしたコミュニティでは、参加人数が増えると求心力を失って、特定のトピックに焦点を移した小規模なコミュニティに昇華していく。

### (5) クラスタサイズ分布のギャップ

湯田ら[Yuta 2007]は、mixi の別の特性として、友人関係ネットワークから GN アルゴリズムを用いて抽出したクラスタのサイズ分布において、10 人以下の小規模なクラスタと 1,000 人以上の大規模なクラスタの間にギャップがある(大規模なクラスタの頻度がより大きい)ことを報告している。そして、このギャップがネットワークノードの最近接ノードを一定の比率でランダムに他のノードに置き換える CNR モデルによって再現されることを示している。

## 2.3 SNS の成長過程

mixi のデータ分析等からは、SNS におけるソーシャルネットワークの成長過程がつぎのように推測される(cf. [Truong 2007])。

- (1) 最初にコアコンポーネントが実生活の友人関係を通じて拡大する。
- (2) 続いてコアコンポーネントに含まれない新しいユーザが参加して独立した小規模なクラスタが出現する。
- (3) そしてコアコンポーネントは結合の強い小規模なコミュニティへと分化する。
- (4) また独立した小規模なコミュニティがコアコンポーネントに吸収される。
- (5) さらにユーザの SNS への参加・脱退や興味の変化などによってコミュニティの分化・融合が起こる。

## 3. 適応的ネットワーク

複雑ネットワークには、ネットワークのダイナミクスとネットワーク上のダイナミクスという 2 つの研究対象がある[Gross 2008]。前者はネットワークのトポロジーの変化を扱い、後者はネットワークの各ノードの状態変化を扱う。結合されたダイナミカルシステムの同期現象および集団での意見形成や伝染病の拡大のような接触過程の研究によって、ネットワークのトポロジーがノードのダイナミクスに影響することがわかってきた。実世界の多くのネットワークでは、トポロジーの時間発展がノードの状態に結びついており、その逆も言える。つまり、ネットワークのトポロジーと各ノードの状態との間にはフィードバックループが存在する。このようなフィードバックループをもつネットワークは適応的ネットワークと呼ばれる[Dorogovtsev 2008][Gross 2008][Gross 2006]。ここでフィードバックループは、各ノードの近傍のみに存在することから、協同現象におけるマクロパラメータとマイクロパラメータの関係とは異なる。SNS のネットワーク成長をモデル化するには、適応的ネットワークの枠組みが基礎になると考えられる。

Holme と Newman [Holme 2006]は、集団での意見形成における各個人の意見の変化と、意見交換のネットワークとの間のフィードバックループについて研究した。彼らのネットワークモデルは以下の要素からなる。

- ・各ノードは、 $G$  個の意見の内の 1 つの意見を状態としてもつ。ノード数を  $N$  とする。
  - ・ノード間に全体で  $M$  個のリンクが存在する。
  - ・初期ネットワークの各ノードの状態とリンク配置はランダムに設定される。
  - ・単位時間にネットワークはつぎの規則で変化する。
1. 1 つのノード  $i$  をランダムに選び、 $i$  がもつリンク(もしあれば)から 1 つをランダムに選んで、そのリンク先を確率  $\phi$  で  $i$  と同じ意見をもつ  $g_i$  をもつノードに置き換える。

2. さもなくば、確率  $1 - \phi$  で  $i$  のリンク先  $j$  をランダムに選び、 $i$  の意見を  $g_j$  に変える。

規則 1 は同じ意見をもつ人の間に新しい相互作用が生じる(と同時にすでにあった相互作用がなくなる)過程を表し、規則 2 は相互作用によって意見が変化する過程を表している。このネットワークは最終的に同じ意見をもつコンポーネントに分割された意見一致状態に達する。この意見一致状態に達するまでの時間  $\tau$  は、意見の安定性を表す確率  $\phi$  について相転移を起こす(図 1)。 $\tau$  の分散  $V_\tau$  のピークに対応する臨界確率  $\phi_c$  は  $\gamma = M / N$  に対してほぼ一定であり、平均次数  $\langle k \rangle$  が大きくなるにしたがって大きくなる。このネットワークモデルで起こる相転移は、静的なネットワークで起こるパーコレーションとは異なり、意見一致が非平衡ダイナミクスによって生じるという意味で本質的に動的である。このモデルは、意見形成において意見の安定性の臨界点の近くではその時間発展が大きく変化する実例を与える。

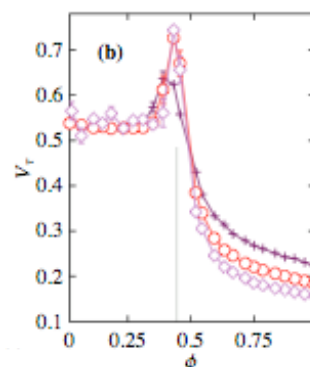


図 1. 意見収束時間の相転移[Holme 2006]

## 4. グループ形成モデル

ここでは紙面の都合により、適応的ネットワーク上の意見形成を中心としたグループ形成モデルの研究について述べる。

### 4.1 適応的ネットワーク上の意見形成

Kozma と Barrat [Kozma 2008]は、Deffuant モデルに基づいてエージェント間の接触の適応性が集団での意見形成における意見の収束にどのように影響するかを研究した。彼らのモデルでは、エージェントの状態は  $[0, 1]$  区間の連続的な意見によって表され、つぎの規則によって相互作用して状態が変化する。

1. 意見の差が閾値  $d$  以内のエージェントだけが接触する。
2. 接触した 2 つのエージェントの状態は、状態の差に収束パラメータ  $\mu$  ( $\leq 0.5$ ) を掛けた分だけ互いに近づく。
3. 単位時間に 1 つのリンクを選び、その両端ノードの意見の差が閾値  $d$  を超えていれば、確率  $w$  でリンクを除去して新しいリンクをランダムに生成し、さもなければ何もしない。

集団の意見を  $[0, 1]$  区間の連続値で表すことは、個人の意見が隣人の意見によって少しずつ変化し、その変化の程度を表す収束パラメータによって全体での意見一致や意見の分極が起こることを意図している。意見の状態表現としては、他に、賛成・反対の 2 状態、多面的な意見を表すベクトル(各成分は連続値または離散値)などが可能である。規則 1 は人の集団では意見の近い人がよく接触することに対応し、規則 2 は意見交換によって意見が近づくことに対応する。さらに規則 3 は、意見の遠い人との接触が避けられることに対応する。彼らのモデルでは、閾値  $d$  に対して収束クラスタ数  $N$  が非線形的に変化する(図 2)。この結果は、適応的なネットワーク上の意見形成が意見変化の程度を表すパラメータの小さな変化によって、形成される意見分布が大きく変わることを再現している。

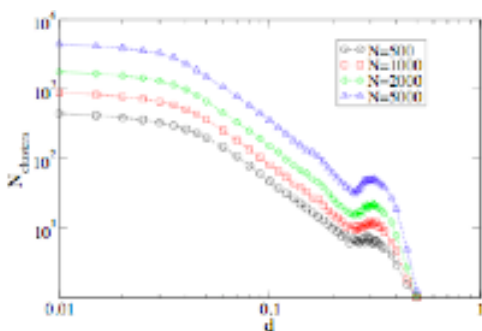


図 2. 収束クラスター数の非線形性[Kozma 2008]

#### 4.2 グループ形成と社会進化

Gerd と Bullock [Gerd 2008] は、適応的ネットワークにおけるグループ形成を基礎として、ソーシャルネットワークの時間発展を研究した。グループは、社会的相互作用の基本過程であり [Leskovec 2008a][Leskovec 2008b], 多くの社会現象で目的や特性を共有する個人の集団として認められている。グループ形成と社会進化の間には双方向の関係があり、グループ形成過程は比較的短期的であり、ソーシャルネットワークの全体構造の進化はより長期的であると考えられる。彼らは、グループ形成段階と社会進化段階の 2 つの過程を交互に行う下記のモデルによって、グループサイズに非線形的な変化が起こることを観察した(図 3)。

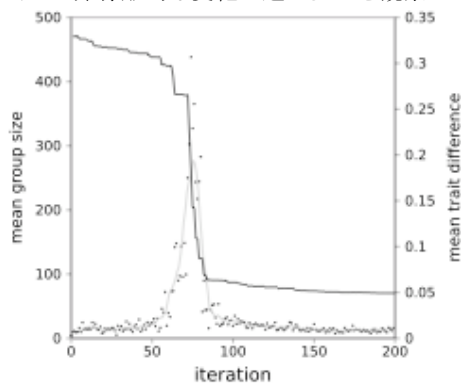


図 3. グループサイズの相転移[Gerd 2008]

#### 4.3 グループ形成過程の特徴

これらのグループ形成モデルに共通する特徴は、つぎの 2 点である。

- (1) 同調行動: 隣人の影響によって、人の状態(意見など)が隣人の状態に近づくように変化する。
- (2) 選択行動: 新しく隣人を作るときは、自分の状態に近い人や自分の隣人の隣人から選択する。

さらに、ネットワークの拡大を再現するには、ユーザの活動の寿命や休止を考慮しなければならない。したがって、SNS にグループ形成を解釈するための成長するネットワーク上の協調モデルには、これらの特徴を必須な要素として組み込む必要があると考えられる。

#### 5. 同調と選択のモデル化

個人の意見や行動が他者の意見や行動に近づくように変化することは、社会心理学では同調行動と呼ばれる[我妻 1987]。同調行動は、お店に行列ができていたり入りたい心理や、選挙の投票が周りの人の意見に影響される現象などを、人間の心の特性として説明しようとする。すなわち、人間は無意識に集団に協調した行動をとるようにできている。SNS での友人関係の形成

においても、自分の周りの集団が SNS に参加していると参加したくなり、友人がその友人を SNS に招待していると自分も同じように自分の別の友人を招待するのではないかと考えられる。

一方で、人間は個人によって好き嫌いがあり、自分の好みによって活動する集団やつきあう相手を選択している。個人が集団を選択して参加すると、集団内の人間関係が変化して他のメンバーに対する影響が変化すると同時に個人の好みも集団の影響を受けて変化する。適応的ネットワークにおけるネットワークのトポロジーと各ノードの状態とのフィードバックは、まさに集団における同調と選択をモデル化するものであると考えられる。

同調行動が起こる理由の説明に情報カスケード・モデル[山口 2003]がある。このモデルは、不確実な状況での意思決定において、最初に行動した主体の行動を見て、それに続く主体が最初の人の判断が正しいだろうと考えて行動することによって、人々を特定の行動へと向かわせる信念の形成過程を説明する。つまり、情報の不足を他者の行動についての解釈で補うことで集合行動が起こるとする。SNS では、ユーザの行動は日記や掲示板への書き込み、および友人リストの開示によって他者から観察できる。したがって、SNS における友人関係ネットワークの成長において同調行動が重要な役割をもつならば、SNS 上での書き込みと友人リストがユーザ間の社会的相互作用の重要な要素であると言える。サーベイで取り上げたモデルは、いずれも SNS におけるユーザの同調行動の結果として適応的ネットワークが生じているとしており、ユーザの状態変化に対する書き込みの内容の影響や、友人関係の生成・削除に対する友人リストの効果は陽にはモデル化されていない。これらの要素をどのようにモデル化するかは今後の課題である。

#### 6. ソーシャルダイナミクスのモデル化

SNS やソーシャルブックマークなどのソーシャルソフトウェア上でのユーザの協調行動を的確に予測できるようなモデルの構成に向けて、ここではソーシャルダイナミクスの統計力学[Castellano 2007]を基礎として、成長するネットワーク上の協調モデルについて検討する。モデルに組み込むべき要素は、適応的ネットワークにおいて、ノードの状態変化に対する他のノードがもつ情報の影響と、リンクの生成・削除に対する局所的なトポロジーの影響である。

##### (1) 状態変化に対する情報の影響

集団での意見形成やうわさの伝播などの現象は、一般的に社会的拡散現象としてモデル化される。これらの現象における社会的相互作用は本質的に非対称であり、情報は知っている人から知らない人へと流れる。SNS やソーシャルブックマークにおいても、他のユーザがもつ情報の影響は一方方向に伝播する。うわさの伝播については、伝染病の拡散に対する SIR モデルに基づく DK モデル[Daley 1964]がモデル化の基礎になると考えられる。DK モデルは、疫学の SIR モデルの情報拡散に対するアナロジーであって、エージェントは 3 状態(未知, 伝播可, 伝播不可)をもつ。

##### (2) 局所的なトポロジーの影響

ネットワークと状態の共進化の研究は、空間ゲームに対するゲーム理論的アプローチ[生田目 2004]から始まった。Potts モデルに基づく Holme と Newman の研究[Holme 2006]は、複雑ネットワークからのアプローチの先駆けであり、本論文ではこれに続く研究をサーベイした。友人関係のネットワークが陽に存在する SNS については、友人リストを局所的なトポロジーの情報源として使うことができる。しかし、ソーシャルブックマークでは、ユーザ間の相互作用のネットワークが開示されていないので分析がサイトの部

外者には困難である。著者ら[Klaisubun 2009]はソーシャルブックマークにおける相互閲覧行動を他のユーザに関する覚知情報として提供することを提案しているが、この相互閲覧行動を相互作用としてネットワークの成長を分析することが可能であると考えられる。

以上の検討では、ネットワーク構造のノードの状態変化への影響において局所的なトポロジーのみを扱ったが、ノード間の相互作用の強さを表すリンクの重みも重要な要素であると考えられる。この点は今後の検討課題である。

## 7. 物理学と社会学の接点

ここでサーベイした研究では、ソーシャルネットワークのダイナミクスを解析する方法として、エージェントベースシミュレーション(ABS)[Gilbert 2005]が使われている。ABSは、個人の行動をエージェントの動作ルールとしてモデル化し、個人間の相互作用をエージェント間の情報交換によってシミュレートする。ABSによる解析は、ミクロな個人の行動からマクロな社会の特性を導く社会学のアプローチである。これに対して、物理学においてミクロな原子・分子の状態変化からマクロな物質の性質を導くアプローチに統計力学[Feynman 1972]がある。統計力学の原理は、系のマクロな特性をミクロな状態の出現確率の重み付き平均として計算することである。状態の出現確率は一般に系のエネルギーの関数として与えられ、系のエネルギーは要素の相互作用によって決まる。ここでの相互作用は例えば光子の交換(電磁的相互作用)などである。モンテカルロ法シミュレーション[Newman 1999]などによってマクロな特性を計算するときには、相互作用による状態変化をマルコフ過程でモデル化してアンサンブル平均を求める。物理学と社会学におけるこれらのシミュレーション手法は、ミクロな性質からマクロな性質を導くという点で似ているが、その原理はまったく異なっている。モンテカルロ法の状態変化の規則が状態の出現確率分布を求めるための仮定であるのに対して、ABSの動作ルールは個人の意思決定過程のモデルであり、系の統計的性質ではない。すなわち、ABSにおける系の時間発展はエージェントの動作ルール(確率的要素を含むことがある)によって決定論的に起こっている。このことはソーシャルネットワークのダイナミクスをモデル化するときに留意する必要がある[Dorogovtsev 2003]。

## 8. おわりに

ソーシャルソフトウェア上でのユーザの協調行動を的確に予測できるようなモデルを構成するという課題に対して、本論文は適応的ネットワークに関する研究のサーベイに基づいて検討した結果、ノードがもつ情報の他のノードの状態変化に対する影響をモデル化することが重要な課題であるとの見通しを得た。特に、ユーザがソーシャルソフトウェアに参加するかどうかの判断には、すでに参加しているユーザが発信している情報や、そこにどのような情報に興味をもつグループがあるかが大きく影響すると考えられる。SNSで観察されるさまざまなグループの形成過程を、モデルパラメータの設定によって統一的に再現できるモデルの構成が今後の課題である。

## 参考文献

[Boyd 2007] Boyd, D. M., Ellison, N. B. "Social network sites: Definition, history, and scholarship." *Journal of Computer-Mediated Communication*, 13 (1), article 11 (2007).  
 [Castellano 2007] Castellano, C., Fortunato, S., Loreto, V. "Statistical physics of social dynamics." arXiv:0710.3256 (2007).

[Daley 1964] Daley, D. J., Kendall, D. G. "Epidemics and Rumours." *Nature*, 204, 1118 (1964).  
 [Dorogovtsev 2008] Dorogovtsev, S. N., Goltsev, A. V., Mendes, J. F. F. "Critical phenomena in complex networks." *Reviews of Modern Physics*, Vol. 80, No. 4, pp. 1275-61 (2008).  
 [Dorogovtsev 2003] Dorogovtsev, S. N., Mendes, J. F. F. *Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW*. Oxford University Press (2003).  
 [Feynman 1972] Feynman, R. P. *Statistical Mechanics*. Benjamin, Inc. (1972).  
 [Geard 2008] Geard, N., Bullock, S. "Group formation and social evolution: a computational model." *Artificial Life XI*, pp. 197-203 (2008).  
 [Gilbert 2005] Gilbert, N., Troitzsch, K. G. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press (2005).  
 [Gross 2008] Gross, T., Blasius, B. "Adaptive coevolutionary networks: a review." *J R Soc Interface*, 5 (20), pp. 259-71 (2008).  
 [Gross 2006] Gross, T., D'Lima, C. J., Blasius, B. "Epidemic dynamics on an adaptive network." *Phys. Rev. Lett.* 26;96(20):208701 (2006).  
 [Holme 2006] Holme, P., Newman, M. E. J. "Nonequilibrium phase transition in the coevolution of networks and opinions." *Phys. Rev. E* 74, 056108 (2006).  
 [Klaisubun 2009] Klaisubun, P., Ishikawa, T. "Design and Evaluation of Mutual Awareness Function in Social Bookmarking Service to Foster Collaborative Information Gathering." *情報処理学会論文誌*, Vol. 50, No. 5, to appear (2009).  
 [Kozma 2008] Kozma, B., Barrat, A. "Consensus formation on coevolving networks: groups' formation and structure." *J. Phys. A: Math. Theor.* 41, 224020 (2008).  
 [Leskovec 2008a] Leskovec, J., Backstrom, L., Kumar, R., Tomkins, A. "Microscopic Evolution of Social Networks." *KDD 2008*: 462-470 (2008).  
 [Leskovec 2008b] Leskovec, J., Lang, K. J., Dasgupta, A., Mahoney, M. W. "Statistical properties of community structure in large social and information networks." *WWW 2008*, pp. 695-704 (2008).  
 [Newman 1999] Newman, M. E. J., Barkema, G. T. *Monte Carlo Methods in Statistical Physics*. Oxford University Press (1999).  
 [Truong 2007] Truong, H. "Network Structure, Diffusion and Growth Over Time in a Facebook Application." <http://www-personal.umich.edu/~ladamic/courses/si508f07/projects/facebook.pdf> (2007).  
 [Yuta 2007] Yuta, K., Ono, N., Fujiwara, Y. "A Gap in the Community-Size Distribution of a Large-Scale Social Networking Site." arXiv:physics/0701168 (2007).  
 [我妻 1987] 我妻 洋. "社会心理学入門(上)" 講談社 (1987).  
 [石川 2009] 石川 孝. "成長するネットワーク上の協調モデル" 第5回ネットワーク生態学シンポジウム (2009).  
 [生田目 2004] 生田目 章. "ゲーム理論と進化ダイナミクス" 森北出版 (2004).  
 [松尾 2007] 松尾 豊, 安田 雪. "SNSにおける関係形成原理—mixiのデータ分析—." *人工知能学会論文誌*, Vol. 22, No. 5, pp. 531-541 (2007).  
 [山口 2003] 山口勝業. "行動ファイナンスの社会心理学的基礎." *証券アナリストジャーナル*, 2003年2月号 (2003).