

災害時の社会的ネットワーク生成の巨視的特性*

Macroscopically social network formation at disaster on random network model*

浦田淳司**・羽藤英二***

By Junji URATA**・Eiji HATO***

1. はじめに

自然災害の発生時に、人的被害を最小限に抑えるためには、災害の状況や危険性といった災害情報を被害地域の全ての住民に伝えることが必要である。避難誘導のための災害情報伝達の手段として、テレビやラジオによるマスメディアのよる広い範囲を対象とした情報発信よりも、速達性・正確性に優れる防災行政無線や消防の巡回車による情報伝達、隣人間や地区自治会内での情報交換が注目されつつある。なかでも、地域住民間での情報伝達は、地区スケールでの細緻で即時的な災害状況の情報を網羅的に伝達することが可能である。また、地域住民の間では、そうした情報のやりとりとともに、住民同士の共同避難や助け合い活動が行われ、地区を被害から守る役目を果たしている。そうした災害時の住民間の紐帯形成要因を理解することは、災害時の情報伝達速度や地域内弱者を予測することにつながり、有用であると考えられる。そこで、本研究では、災害時に実際に行われた地域住民間での情報伝達行動と協働行動に着目し、災害時の住民ネットワークの生成についての考察を行う。

ネットワーク生成に関して、近年、複雑ネットワークの研究が盛んになっている。Small WorldネットワークやScale-freeネットワークをはじめ、現実のネットワークの構造特性を持つネットワークモデルが提案されている。本研究では、複雑ネットワークモデルと観測された災害時の住民ネットワークの形成過程についての比較を行うことで、災害時の住民ネットワーク形成について、複雑ネットワークモデルが適用可能であることを示す。

2. データ概要

本研究における災害時の住民の行動データは、2004年8月から9月にかけて、愛媛大学工学部環境建設工学科都

*キーワード：防災計画、複雑ネットワーク

**学生員、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻

(東京都文京区本郷7-3-1、TEL:03-5841-1672、

E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp)

***正員、工博、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻

(E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp)

市環境計画研究室防災グループによって、取得・作成されたものである¹⁾。

調査は2004年8月18日の台風15号と9月29日の台風21号の上陸時における愛媛県新居浜市の楠崎、大生院地区等の住民の行動を対象とした。どの地区も住民は30-100名程度の地区で、豪雨により、かなり多くの世帯が浸水被害を受けており、また土石流の発生により計8名もの死者を出している。

行動データは短い時間で変化する災害状況とそこでの複雑な対応行動や住民間コミュニケーションを把握するために、ヒアリングにより収集された。調査では、被災当日の行動を時系列に沿って回答してもらい、これをビデオデータで記録し、発話内容をコーパス化し、各世帯の当日の行動を時系列にそって、まとめている。時間についての記憶の曖昧な部分は、時間を推定できる単語(食事の前後など)を用いることで推測している。

3. 優先的選択型成長モデル

(1) 優先的選択型成長モデルの導入

複雑ネットワークモデルでは、少数のルールにより、現実ネットワークの特性を示すネットワークを形成する様々なモデルが考案されている。災害時のネットワーク形成については、情報伝達パラメータを基にしたシミュレーション²⁾研究は行われている。たいして、成長型の複雑ネットワークモデルを用いることで、二者間の関係や最大紐帯数などの制約を加えずに、ネットワーク生成を行える。さらに、優先的選択型成長モデルは、各ノードにリンク形成確率を与えることで、ノードの差別化ができる特徴を持つ。そこで、災害時のネットワーク生成モデルとして、優先的選択型成長モデルを導入する。

(2) BAモデル

1999年にBarabasiらによって発見されたネットワークモデル(以下、BAモデル)は、そのネットワークの次数分布にベキ則が導出されるモデルである。このモデルの重要な構成要素として、2つのものがあげられる。ひとつはネットワークが成長していくことであり、時間と

ともにノードがネットワークにひとつずつ追加されていき、ネットワークが成長する。もうひとつは、優先的選択のルールである。新しくネットワークに加わるノードのもつリンクはネットワーク内の次数の高いノードが獲得しやすいというルールである。ノードがネットワーク内に n 個あり、既存ノード v_i は次数 k_i を持つ。新しいリンクが v_i に結びつく確率は、

$$\prod(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^n k_j}, \quad (1 \leq i \leq n) \quad (1)$$

とする (分母は正規化定数)。これにより、生成されるネットワークは、次数の確率密度 $p(k)$ と k^{-3} が比例するという性質をもつ (導出は (3) 参照)。これは、実世界のネットワークデータで観測される次数分布³⁾である。このモデルでは古株のノードほどリンクが多くなりやすい傾向 (first-mover-advantage) を持つ。

(3) 適応度モデル

BAモデルはfirst-mover-advantageの特性をもつが、現実には、古くからネットワークにいるほどハブになりやすいとは限らない。そこで、BAモデルを拡張したのが、適応度モデル⁴⁾である。適応度モデルでは、時刻 t_i に加わるノード v_i にリンクの獲得のしやすさを示す適応度 η_i を、確率密度 $\rho(\eta)$ に従って、与える。これにより、新しいリンクが v_i に結びつく確率は、

$$\prod(v_i) = \frac{\eta_i k_i}{\sum_{j=1}^n \eta_j k_j}, \quad (1 \leq i \leq n) \quad (2)$$

で表される。単位時間あたりに m 本のリンクを持った一つのノードがネットワークに追加される。また、次数 k と時刻 t の関係を連続関数と考え、

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \prod(v_i) = \frac{m \eta_i k_i}{\sum_j \eta_j k_j} \quad (3)$$

次数 k_i は時刻のべき乗の形で表されると仮定して、

$$k_{\eta_i}(t, t_i) = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\beta(\eta_i)} \quad (4)$$

とおく。 ($\sum \eta k$) について (5) 式のように集団平均で近似すると、 β は (6) 式のように求めることができる。

$$\sum_j \eta_j k_j \cong \int d\eta \eta \rho(\eta) \int_{t_0}^t dt_0 k_{\eta}(t, t_0) \quad (5)$$

$$\beta(\eta) = \frac{\eta}{c}, \quad \left(c = \int \frac{\eta}{1 - \beta(\eta)} \rho(\eta) d\eta \right) \quad (6)$$

これより、固定した η に対して、時刻 t で次数が k 以上になるノードの確率は、

$$P[k_{\eta}(t) > k] = P\left[t_0 < t \left(\frac{m}{k} \right)^{c/\eta} \right] \cong t \left(\frac{m}{k} \right)^{c/\eta} \quad (7)$$

なので、次数分布 $p(k)$ は、

$$p(k) = - \int \frac{\partial P(k_{\eta}(t) > k)}{\partial k} \rho(\eta) d\eta \\ = \int \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{c}{\eta}} \frac{ct}{\eta k} \rho(\eta) d\eta \propto k^{-\frac{c}{\eta}-1} \quad (8)$$

となる。適応度モデルに、ある確率密度 $\rho(\eta)$ を与えれば、次数について、べき則を得ることがわかる。

このモデルは適応度の高いものがリンクを獲得しやすい傾向 (fit-get-rich) を持つ。

(4) 一人勝ちの状況

適応度モデルは量子統計物理の分野で現れるボーズ気体の現象に対応づけられる。適応度 η とボーズ粒子のエネルギー準位 ε の関係を (9) 式のようにおく。

$$\beta \varepsilon_i = -\ln \eta_i, \quad (\beta > 0) \quad (9)$$

同エネルギー準位のボーズ粒子数とノードの持つリンク数に対応する。ボーズ気体において、ある温度以下になると、最低エネルギー準位に多くの粒子が落ち込むボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) という現象が起こる。複雑ネットワークにおいても、この BEC に対応する適応度の最も高いノードにリンクが集中する一人勝ちの現象⁵⁾ (winner-takes-all) が同定できる。

この現象が災害時のネットワークで起きる場合は、少数の世帯が強いハブ性を持ち、一極集中している状態である。これは、情報伝搬の即時性・多様性に欠けている危険性や、その世帯に問題が起こった場合に地区内のネットワークが切断される可能性が考えられる。ただ、集落の構成世帯数は少なく、ハブ断絶により機能の転位も考えられ、さらなる考察が必要である。

4. 災害時の紐帯形成

(1) 紐帯形成の概念

災害時の住民ネットワークにおいて、各世帯をノードとする。また、紐帯 (リンク) は、会うや話すといった情報伝達行為と救助や共同避難の減災行為が同集落内の世帯間で行われた場合に形成されるとする。

各地域において、住民ネットワークは、普段からの近所付き合いや自治会、縁戚関係などの要因により形成されていると考えられる。それに対して、災害時に形成される紐帯によるネットワークは、各世帯が平時に結ばれた紐帯の中から緊急時における選択を行い、それにより形成された紐帯によるネットワークだと考えられる。

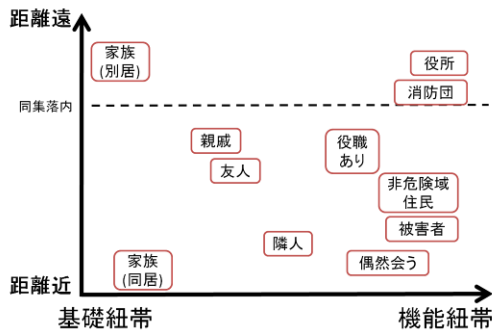


図1 紐帯の分類

(2) 紐帯形成の要因

災害時における紐帯の形成（選択）要因を次に考える。災害時に結ばれる紐帯の種類として二つのものがあると考えられる。一つ目は基礎紐帯で、平時から親密な関係を持っている相手と、危機的な状況において優先的に結ぶ紐帯である。家族や友人との関係がこれにあたる。二つ目は機能紐帯で、平時の関係は希薄だが、紐帯形成によりもたらされる利益が大きく、または紐帯形成のためのコストによる損失が少ないと考え、結ぶ紐帯である。自治会役員や偶然出会った人との関係がこれにあたる。結ばれうる紐帯との距離を縦軸にとり、基礎紐帯と機能紐帯について分類したものが図1である。

基礎紐帯は1対1の特有の関係性により形成される紐帯なのに対し、機能紐帯は特有の関係は必要なく、不特定多数の相手と形成される。

(3) 優先的選択型成長モデルへの適用

このように基礎紐帯と機能紐帯によって構成される災害時の住民ネットワークの形成過程について、優先的選択型成長モデルを適用することを考える。

優先的選択型成長モデルでは、各ノードのもつリンク数は考慮されるが、リンクを結ぶ相手ノードは考慮されない。リンク接続確率（適応度）の高低は、機能紐帯の本数に反映されると思われる。たいては、基礎紐帯については、その形成要因である特有の関係性はモデルでは考慮されない。しかし、優先的選択型モデルにおいて、各ノードは、リンクをm本持って、新しいネットワークに追加される。このはじめから持つリンクを基礎紐帯と捉えることが可能であると考え。

以下では、観測された災害時の住民ネットワークについて、優先的選択型成長モデルとの比較・型分類を行う。

5. 災害時住民ネットワークの型分類

(1) BAモデル型のネットワーク形成

BAモデル型のネットワークの形成過程をもつ災害時のネットワークとして、西楠崎地区の溜池側のネットワークがあげられる（図2）。ネットワークに初めから存在

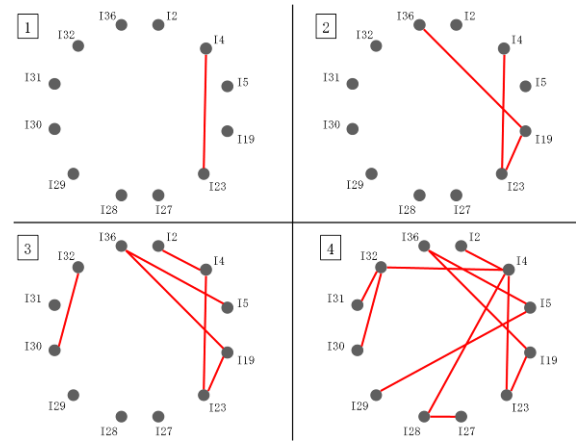


図2 西楠崎地区（溜池側）の災害時ネットワーク

するノードI4が時刻とともにリンク数を増やしている。このネットワークは、ノードI4から溜池の崩壊に関する情報が早い時間帯に発信され、その情報が他のノードに伝搬する形でネットワークが成長している。古株のノードがリンクを多く獲得する傾向にあり、first-mover-advantageの傾向にあるといえる。

(2) BEC型のネットワーク形成

BEC型のネットワークの特徴を持つ災害時のネットワークとして、大生院地区のネットワークがあげられる（図3）。ネットワークに途中から追加されたノード013と025が、最終的にはネットワーク全体のリンクの25本中21本のリンクと結合している。これら二つのノードは土砂崩れによる突発的な被害を受けた世帯である。そのため、適応度が他ノードと比べてかなり高くなり、winner-takes-allの状態になったと考えられる。

(3) 適応度モデル型のネットワーク形成

適応度モデル型のネットワークの形成過程をもつ災害時のネットワークとして西楠崎地区の被災地域側のネットワークがあげられる（図4）。初期からネットワークに加わっているノードH49がリンクを順調に獲得する一方で、途中から加わったノードH12、H69、H90が後半からリンク数を増やすという傾向を持っている。実際の紐帯形成の要因をみてみると、リンク数の多いノードのうち、H49はI4と同じく情報発信、H12・H90は013・025と同じく被災により、適応度が高くなったと考えられる。また、H14・H69は情報発信とともに、共同避難の中心的役割を担っており、適応度が高くなったと考えられる。

(4) スケールフリー性

BAモデル型、適応度モデル型に分類された西楠崎地区のそれぞれのネットワークにおける次数と次数ランクの関係は図5のようになる。どちらもスケールフリー性をもっている。ここでは次数は非連続のため、ランクサイズを用いて比較した。また、近似直線のR²値は、被災

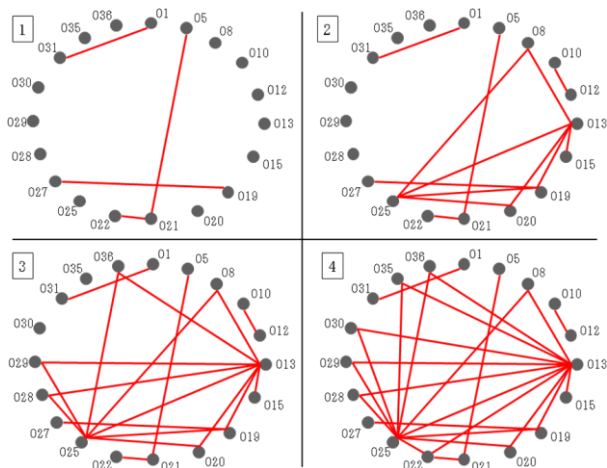


図3 大生院地区の災害時ネットワーク

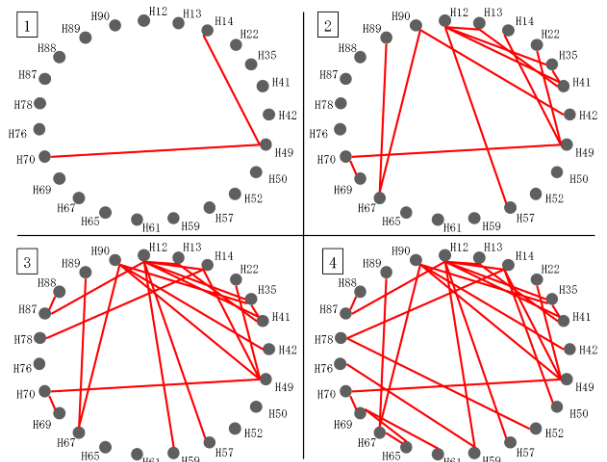


図4 西楠崎地区（被災地域側）の災害時ネットワーク

地域側は0.88、溜池側は0.85と高い値を示している。

図6では上で述べた3地区と西楠崎地区全体について、次数とその確率密度の関係を示した。西楠崎地区と西楠崎被災地域について、直線に近い形をしている。一次近似の傾きは-1.3程度であり、緩やかである。ここで、確率密度の最小値は $1/n$ 以上となり、全体のノード数が少ないと、傾きは緩やかになる。BEC型の大生院地区は、大きな次数を持つノードのため、他と分布が異なる。

6. まとめ

本研究では、優先的選択型成長モデルを観測された災害時の住民ネットワークと比較することで、実ネットワークと比較することで、実ネットワーク形成要因についての考察を行った。実ネットワークはスケールフリー性を示し、適応度はそのノードの情報発信性と被災度に応じて、値が与えられるということが想定できる。

しかし、Bianconiら⁴⁾における優先的選択型成長モデルでは、常にネットワークは連結グラフで成長すること、既存ノード間での新しいリンクの形成はないものと仮定されており、実際の災害時ネットワークにおいて、適応度を与えて、ネットワークの時系列的な成長を捉えるこ

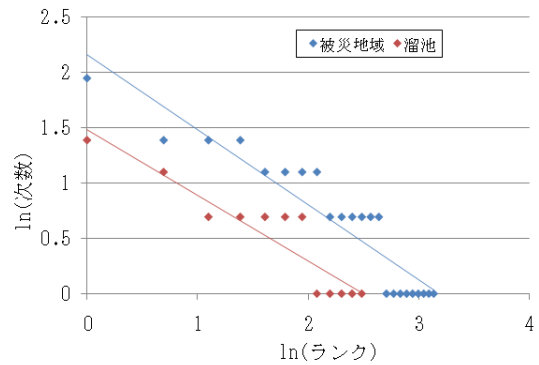


図5 次数とランクサイズの関係(両対数)と近似曲線

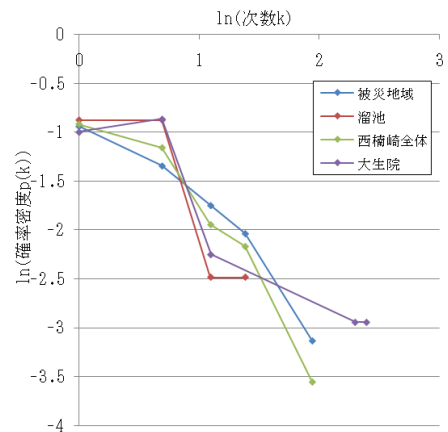


図6 次数と確率密度の関係(両対数)

とはできない。優先的選択型成長モデルを用いて、災害時の仮想的ネットワーク形成を行うためには、モデルの拡張が必要となる。

謝辞: なお本研究を実施するにあたって文部科学省科研費基盤A「プローブ技術を援用したデータフュージョン理論による総合的交通行動調査の高度化（代表：羽藤英二）」の協力を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 羽藤英二, 中川周郎: 被災時の避難行動のグループダイナミクス, 土木計画学研究・講演集, Vol. 3 1, CD-ROM, 2005
- 2) 片田敏孝, 及川康, 田中隆司: 災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発, 土木学会論文集, No. 625/IV-44, pp. 1-13, 1999
- 3) A.-L. Barabasi, H. Jeong, Z. Neda, E. Ravasz, A. Schubert, T. Viscek: Evolution of the social network of scientific collaborations, PHYSICA A, Vol. 311, pp. 590-614, 2002
- 4) G. Bianconi, A.-L. Barabasi: Bose-Einstein condensation in complex networks, Physical Review Letters, Vol. 86(24), pp. 5632-5635, 2001
- 5) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書, 2005