複雑ネットワークモデルを用いた 豪雨災害時の協調行動形成に関する研究

浦田 淳司¹・羽藤 英二²

¹ 正会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)
E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp

² 正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、災害時の住民間の協調行動ネットワーク形成モデルとして、スケールフリー性をもつ複雑ネットワーク形成モデルである適応度モデルを導入した。適応度モデルのリンク形成確率の定式化は、個人の状態変数の分布に応じて、災害時の協調行動ネットワークの形成過程・構造と整合的なネットワークを形成でき、広い範囲を対象とした協調行動シミュレーションを行う際に優位である。また、実データを用いたモデルの検証を行うとともに、世帯の適応度の推定を行った。これにより、災害時における住民の協調行動ネットワークとして有効なスケールフリー構造を実際の災害時の協調行動ネットワークが持ちうることと、時間帯によらず協調行動を行いやすい世帯数が不変であることを確認した。

Key Words : *evacuation, natural disaster, cooperation behavior, social network, complex network model*

1. はじめに

(1) 研究背景

災害時に、人々は時々刻々と変化するリスクや周辺環境等の情報を入手し、災害から逃れるための行動をとる。本研究で対象とする豪雨災害をはじめ、津波災害や火山災害等の前兆となる自然現象が観測できる場合の災害への対応行動は、消防団に促されて避難する行動、家族と合流するための行動、危険地点を見に行く行動、災害発生を知らながらも自宅にとどまる行動と様々である。その中には、他者を頼りにした相談行動、家族や近所の人を心配した援助行動等の他者との協調行動がある。協調行動は自力では対処できない状況下で必要であり、また助けられる命を災害から守るためにも重要である。

災害への備えとして、東日本大震災による甚大な被害や高齢社会の進展による災害時要援護者の増加といった社会背景の中で、協調行動を含めた避難計画の必要性は高まっている。従来型の情報伝達のみを対象とした避難対策に加えて、地域での援助や共同避難等の協調行動を考えた対策が必要となる。一方で、いつ、どこで、どういった規模で発生するかわからない災害に対して計画通りに避難することは難しく、また計画

を知らない住民も数多いため、計画の想定とは異なる事態が起きる可能性がある。こうした中、災害時の行動を想定した上での避難行動計画の立案が必要であり、協調行動を含めた避難行動の理解が求められる。

(2) 既往の避難行動研究

災害時の避難行動に関する研究として、林ら¹⁾では避難者(群)は避難情報を得た直後に避難を始めるという仮定の下で、避難シミュレーションを用いた道路網計画の評価が行われている。ここでは避難者は全て等質と考えられている。それに対して、高棹ら²⁾では、避難者個人の意識差により避難の意思決定のタイミングは異なるという仮定の下、隣人や避難勧告による情報取得や避難開始タイミングを考慮した避難モデルを構築している。社会学の分野において、岡部ら³⁾では、住民避難行動と日頃の危機意識や災害時の住民間コミュニケーションの関係性に着目した研究が行われている。これらは、個人の避難意思決定にむけた情報取得態度や危機意識の影響に着目したミクロ視点の研究となっている。

個人の避難行動に着目した研究として、避難の意思決定に関する研究と住民間の情報伝達に関する研究の大きく二つがある。

まず、避難の意思決定に関する研究としては、本間・片田⁴⁾は実証的な分析から避難者は正常化バイアスの影響で初着情報による避難はせず、複数情報の獲得でリスク認知を高めてから避難する傾向があるとしている。山田・織田澤⁵⁾は、避難行動を群集行動であると捉え、避難意思決定の相互依存的な関係を動学ゲームとしてモデル化し、観察行動により避難の遅れが生じるメカニズムを明らかにしている。中島ら⁶⁾は周囲の仮想エージェント、避難地や危険箇所の情報を、GPS携帯電話を通じて与える避難行動実験を実空間で行い、他者の避難行動が自分の避難経路選択に影響することを示している。避難以外の災害時行動の意思決定を対象とした研究として、羽藤・中川⁷⁾や浦田・羽藤⁸⁾があり、他者との協調行動に着目し、協調行動選択の意思決定過程の概念化や行動形成の特徴に関する分析を行っている。

次に、住民間の情報伝達に関する研究として、片田ら⁹⁾は、選好意識調査で把握した緊急時の危険情報を伝達する相手とその距離等を用いて住民間情報伝達モデルを開発している。萩原・畑山¹⁰⁾ではコミュニティ活性度やコミュニティ内のリンクの強弱を考慮したモデルにより、災害時のコミュニティ内の情報到達度の評価を行っている。これらは、災害時の協調行動のうち危険情報の伝達行動に着目し、情報入手による危機意識の醸成とそれによる避難行動の発生過程に関する研究である。浦田・羽藤¹¹⁾では、救助等も含めた集落内の協調行動について、災害時の時系列推移と協調行動の偏在に着目し、住民間ネットワークの形成に関する分析が行われている。

(3) 研究のアプローチ

個人の状態や意識を基にした災害時の避難行動のモデル化やシミュレーションを行うためには、個人の詳細な情報が必要となる。さらに、他者との協調行動も検討するには個人の人間関係情報も必要となり、情報が詳細になるほど収集は難しくなる。次に、災害時の住民間協調行動は、個人の状態や相手との1対1の相互関係だけで意思決定されているわけではない。地域住民の集団の中で、協調行動をしていない住民を心配する意識や偶然不在であった住民の役割をカバーする意識が働く。つまり、集団の中での個人の役割や他者の行動を考慮した複雑な意思決定が生じている。これらより、他者との協調行動を考慮した避難行動のモデル化にあたっては、個人や人間関係の情報を集約化して取り扱うこと、また集団全体を考慮したモデル化が必要である。そのためのマクロ的なアプローチを本研究では導入する。

地域住民の集団を捉えるマクロ的なアプローチとし

ては、空間的な散らばりを集約するアプローチと人間関係の散らばりをネットワークと捉えるアプローチの2つが考えられる。空間面に関する既往研究として、池田ら¹²⁾では、CPモデルを用いて都市集積・分散の均衡状態を輸送費パラメータという代表的な指標を利用した解析を行い、集積・分散の分岐過程のメカニズムを明らかにしている。また、Candia et al.¹³⁾は携帯利用時の時空間データをパーコレーション理論によって空間分割し、活動集積性等のマクロ的な空間解析を行っている。次に、人間関係ネットワークの面では、ネットワーク科学の分野においてネットワークをマクロ的に捉える研究が行われている。古典的にはブロックモデル¹⁴⁾という手法によりネットワーク構造を簡約化し、構造を理解する手法がある。近年では、多数のネットワークがもつ次数分布のスケールフリー性¹⁵⁾や平均距離の短さ¹⁶⁾といったマクロ的なネットワーク指標を再現できるネットワーク形成モデルとしてBAモデル¹⁷⁾や閾値モデル¹⁸⁾等が開発されている。スケールフリー性をもつネットワークは、平均距離が短く¹⁹⁾、頑強性が高い²⁰⁾という構造的特徴をもつ。これは少数のノードを介するだけでネットワーク全体と繋がることができ、ノードの一部が欠けてもネットワークの連続性が保たれることを意味する。この特徴を災害時の協調行動の人間関係ネットワークがもつことで被害の軽減が可能であり、避難行動計画の中でスケールフリー性をもった人間関係ネットワークの形成を目指すことは有用である。本研究では、協調行動に着目して、マクロ的に地域住民の集団を捉えるにあたり、住民の災害時の協調行動をネットワークとして捉えるアプローチを用いる。

(4) 研究目的

災害時の他者との協調行動形成の特徴の理解のため、協調行動の形成過程と構造の分析とモデル化を行う。その際、災害時に形成される協調行動を人間関係のネットワークとしてマクロ的に捉えるアプローチを用いる。これまでの個人に着目したミクロ的なアプローチによる避難行動研究^{4), 6)}から過去の経験や情報取得状況等の個人差により災害時の行動が異なることがわかっていて、そこで、個人特性を表す情報は少数の変数に集約して導入し、その変数を用いて協調行動の形成確率を定式化し、協調行動ネットワークの形成モデルを構築する。形成モデルとして、災害時の協調行動ネットワークの形成過程や構造的特徴を再現する複雑ネットワーク形成モデルを導入する。モデルの導入により、災害時の人間関係のネットワークの構造や形成過程の特徴を明らかにする。実際に観測された住民行動データを用い、導入した形成モデルの妥当性を検証す

る。あわせて災害時の協調行動ネットワーク形成の特徴やネットワーク内での個人の役割の違いを検討する。

2. ネットワーク形成モデルの導入

(1) 災害時の協調行動ネットワーク形成の枠組み

災害時の協調行動ネットワーク形成過程の特徴を考慮して、ネットワーク形成モデルで導入する4つの枠組みを示す。また、導入する形成モデルにおいて再現されるべき3つの災害時の協調行動ネットワークの特徴を示す。なお、本研究で導入するネットワーク形成モデルでは、協調行動を行う主体をネットワークのノードとし、ノード間のリンクは協調行動の形成を示す。

まず、災害時の協調行動ネットワークは、集団における個人の役割を踏まえた複雑な意思決定の積み重ねにより、複雑性をもったネットワークになると仮定して複雑ネットワーク形成モデルを導入する。複雑ネットワークとはノードの次数分布がベキ則をもつネットワークを指し、多くのネットワークはこの性質をもっている¹⁵⁾。二つ目に、災害時は協調行動を行う主体が時系列に従って増加するため、ネットワーク形成モデルではネットワークの成長を表現する必要がある。次に、主体は協調行動を行う相手を合理的に選択していると考え、例えば、援助が必要な世帯や情報を多くもっている世帯は協調行動相手となりやすい。そこで、より優位な協調行動形成相手を選択する優先的選択のルールを三つ目の枠組みとする。このルールの適用のため、主体の協調行動形成の優劣を表す個人固有の状態変数の導入が四つ目の枠組みである。これらのネットワーク複雑性、ネットワークの成長、優先的選択、ノードの固有性の4つの形成過程に関する枠組みを再現するネットワーク形成モデルを次節では導入する。

次に、災害時に形成されるネットワークの構造的特徴を考察する。まず、地域住民の間では普段の生活でソーシャルネットワークが形成されており、そのネットワークの密度やクラスター性は高い。災害時には、普段のネットワークでつながる相手の中から、緊急性と必要性を考慮して相手を最小限だけ選択し、協調行動を行うと考える。このため、災害時のネットワークは、クラスター性は喪失する。一方で、自治会長等の災害情報を多く持つ人や多くの人を援助できる人がネットワークの中で中心的な役割を果たし、ネットワークのハブとなる。また、災害時の緊急性、共助意識、同調意識のため、情報伝達や相談行動等の協調行動は早期に地域の中で広まり、ネットワーク全体の平均距離は短くなる。これらの低いクラスター性、ハブノードの存在、短い平均距離という3つのマクロ的なネッ

トワークの特徴が再現できるネットワーク形成モデルを次節で導入する。

(2) 適応度モデルの導入

災害時の協調行動ネットワーク形成モデルとして、前節で示した4つの形成過程の枠組みを再現する適応度モデル²¹⁾を導入する。このモデルにより形成されるネットワークは、災害時の協調行動ネットワークの3つの構造的特徴である低いクラスター性²²⁾、ハブノードの存在²¹⁾、短い平均距離¹⁹⁾を持つ。ここでは、適応度モデルのネットワーク形成の枠組みと次数分布の説明を行う。

適応度モデルのネットワーク形成過程は、時間 t_i に新規にノード v_i がネットワークに加入し、ネットワーク内の既存ノードとリンクを形成する。これに伴い、ネットワークは時間に比例して成長する。ノード v_i は固有の適応度 η_i を持ち、加入した新規ノードと既存のノード v_j がリンクを形成する確率は式(1)とする。 k_i はノード v_i の次数(リンクの数)を示し、 n はネットワーク全体のノードの数を示す。適応度が高かつ次数が多いノードがリンクを形成しやすい。

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

次に、適応度モデルの次数分布についてである。次数 k と時間 t の関係を連続関数と考え、ノード v_i の単位時間あたりのリンク形成確率は式(2)となる。加入した新規ノードはネットワーク内の既存ノードと m 本のリンクを形成する。

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \prod(v_i) = \frac{m \eta_i k_i}{\sum_j \eta_j k_j} \quad (2)$$

次数 k が時間 t のベキ乗 ($\beta(\eta)$ と仮定) であると仮定し、ノード v_i の次数を式(3)で表す。 t_i はノード v_i がネットワークに加入した時間を示す。

$$k_{\eta_i}(t, t_i) = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\beta(\eta_i)} \quad (3)$$

適応度 η は確率密度関数 $\rho(\eta)$ に従ってノードに与えられる。また、時間 t を連続量として近似すると、ノードは各時間で追加されるため、 $\sum_{j=1}^n$ は $\int_0^t dt_i$ と近似できる。適応度 η は時間 t とは無関係に与えられるため、式(3)を用いて、式(1)の分母は、

$$\begin{aligned} \left\langle \sum_{j=1}^n \eta_j k_j \right\rangle &\cong \int_0^\infty d\eta \eta \rho(\eta) \int_0^t dt_i k_{\eta_i}(t, t_i) \\ &= \int_0^\infty \eta \rho(\eta) m \frac{t - t^{\beta(\eta)}}{1 - \beta(\eta)} d\eta \end{aligned} \quad (4)$$

となる。次数 $k(t)$ は時間 t より早くは増えないため、 $\beta(\eta) < 1$, $t \rightarrow \infty$ で $t^{\beta(\eta)} \rightarrow 0$ であり、

$$\sum_j \eta_j k_j \cong cmt \quad (5a)$$

$$c = \int \frac{\eta}{1 - \beta(\eta)} \rho(\eta) d\eta \quad (5b)$$

となる。式(2)に代入すると、

$$\frac{\partial k_\eta}{\partial t} = \frac{\eta k_\eta}{ct} \quad (6)$$

となり、式(3)の仮定が成り立つためには、

$$\beta(\eta) = \frac{\eta}{c} \quad (7)$$

が満たされればよい。式(3)と式(7)より、時間 t でノードの次数が k 以上となる確率 $P[k(t) > k]$ は、

$$P[k_\eta(t) > k] = P\left[t_0 < t \left(\frac{m}{k}\right)^{c/\eta}\right] \cong t \left(\frac{m}{k}\right)^{c/\eta} \quad (8)$$

となる。ノードの次数が k となる確率 $p(k)$ は、

$$\begin{aligned} p(k) &= - \int \frac{\partial P(k_\eta(t) > k)}{\partial k} \rho(\eta) d\eta \\ &= \int \left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{c}{\eta}} \frac{ct}{\eta k} \rho(\eta) d\eta \propto \int d\eta \rho(\eta) \frac{c}{\eta} \left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{c}{\eta}+1} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。適応度 η の分布によっては、 $p(k)$ はベキ則に従うことを次節で示す。

(3) 適応度の分布とネットワーク形成過程

適応度の分布とネットワークの形成過程の関係を考察する。まず、適応度 η が全て 1 で等しい場合は、式(5b)、式(7)、式(9)より $p(k)$ は k^{-3} と比例し、スケールフリー構造をもつ。リンク形成確率は次数 k のみに比例し、早くからネットワークに加入したノードがリンクを形成しやすい。これを **first-mover-advantage** 型のネットワーク形成過程という。

次に、 $\rho(\eta)$ が $[0,1]$ の一様分布の場合は、 $m=1$ の時、 $p(k)$ は式(10)となる。

$$\begin{aligned} p(k) &\propto \int_0^1 d\eta \frac{C^*}{\eta} \frac{1}{k^{1+C^*/\eta}} \approx \frac{k^{-(1+C^*)}}{\log(k)} \\ (\exp(-2/C^*) &= 1 - 1/C^*, \quad C^* \cong 1.255) \end{aligned} \quad (10)$$

k が大きい場合以外は、 $p(k)$ と $k^{2.255}/\log(k)$ の関係は両対数グラフで $p(k)$ と $k^{2.255}$ とほぼ同様の直線関係にあり、スケールフリー構造をもつ²¹⁾。この場合は、リンク形成確率は次数 k だけではなく、適応度 η の大きさにも影響を受ける。適応度の高いノードもリンクを形成しやすい。これを **fit-get-rich** 型のネットワーク形成過程という。

次に、適応度 η のバラツキが大きく、ネットワーク

図-1 3つのリンク形成過程と擬似ノード導入

内に適応度の大きいノードが存在する場合、その適応度の高いノードにリンクが集中する²³⁾。これを **winner-takes-all** 型のネットワーク形成過程という。

このように、ネットワーク内のノードの適応度の分布によってネットワーク形成過程は異なる。

(4) 適応度モデルの拡張

本研究では、適応度モデルを実際に観測されたネットワークの形成過程に導入する。次章以降では、災害時の行動データを用いて、ノードの適応度の推定を行う。実際の協調行動ネットワークのリンク形成過程と適応度モデルのリンク形成過程には違いがあり、拡張が必要となる。本節では、適応度モデルの実際のネットワークへの導入に向けた拡張を行う。

適応度モデルのリンク形成過程は、単位時間ごとに新規ノードがネットワークに追加され、既存ノードとリンクを形成する。対して、実際の災害時の協調行動は、協調行動を既に実施した主体同士やどちらも協調行動を実施していない主体同士でも協調行動が形成される。これらの既存ノード同士のリンク形成や新規ノード同士のリンク形成は、適応度モデルでは表現されない。

この問題に対応するため、擬似ノードの導入により、適応度モデルを拡張する(図-1)。まず、既存ノード同士のリンク形成は、新規ノードとして擬似ノードを追加し、擬似ノードが該当する既存ノードとリンク形成を行うことで代用する。連続する時間で2つの擬似ノードを追加し、既存ノードとリンク形成を行う。次に新規ノード同士のリンク形成は、リンクのない擬似ノードを予めネットワークに付加しておき、追加された新規ノードと擬似ノードがリンクを形成することで代用する。連続する時間で2つの新規ノードがそれぞれ別の擬似ノードとリンク形成を行う。擬似ノードの導入によって、既存ノード同士、新規ノード同士のリンク形成過程を適応度モデルのリンク形成過程と同様に表すことができる。擬似ノードを用いたリンク形成は

当該ノード同士での直接のリンク形成はない。しかし、適応度モデルにおけるリンク形成確率は、式(1)よりノードの次数と適応度のみに依存しており、リンク形成相手とは無関係である。リンク形成相手が擬似ノードであっても次数が一致していれば、リンク形成確率への影響はない。また、擬似ノードの適応度として十分小さな値を与えれば、擬似ノードが新たにリンクを形成する確率は十分小さくなる。他ノードのリンク形成確率への影響は小さく、適応度の推定への影響は無視できる。また、擬似ノードの次数は高々1であり、次数2以上の次数分布には影響がない。次章では、この拡張した適応度モデルを協調行動形成モデルとして実際の災害時の行動データに適用する。

(5) 適応度モデル導入の考え方

本研究で導入する適応度モデルは、個人の状態を1つの変数の適応度 η に集約し、この状態変数とそれまでの協調行動形成数のみにより、リンク形成確率を表す。この形成確率の定式化と適応度の分布によりネットワークのマクロ構造が導出され、そのマクロ構造は災害時に形成される協調行動ネットワークの構造と特徴が合致することを2.(1)で説明した。次章以降では、実際に災害時に形成された実ネットワークと適応度モデルで導出されるネットワークの形成過程・構造が整合的であることを実証する。

適応度モデルの形成確率では、地理的距離や普段の親交等の二者の相互関係が考慮されていない点が課題に映えると思われる。しかし、避難計画での検討対象は本研究で扱った小集落よりも大規模の範囲・人であるため、二者の関係性を検討するには対象者数の二乗の膨大なデータ量が必要となる。そこで、本研究では適応度の分布により場の状態を表し、場の状態に呼応して形成されるネットワークが、二者の関係性を考慮せずとも、マクロ的に現実に整合するモデルを提案している。また、適応度はネットワーク内の全ての他者との親密さ・距離関係等を集約した変数であり、他者との相互関係の影響はモデルの中に反映されている。

もちろん、ミクロ的にみれば、二者間の協調行動形成の積み重ねによりネットワークが形成されており、二者の相互関係を考慮しないことによる適応度モデルの課題の検討が必要であろう。そのためには、個人の災害時の行動選択を明らかにした上で、個人行動の積み重ねにより形成されたネットワークと適応度モデルのネットワークとの比較検証が今後必要と考えられる。本研究では、3.(5)において、二者の相互関係の一つである二者間距離と協調行動形成の関係を実データから集計し、二者の相互関係を考慮しない適用度モデル導入の留意点を考察する。

表-1 調査対象地区の総住戸数と調査数

調査対象	地区	総住戸数	調査数	調査率
8月18日 台風15号	西楠崎	90戸	49戸	54%
	東楠崎	43戸	9戸	21%
	唐津山	13戸	6戸	46%
9月29日 台風21号	白浜	396戸	60戸	15%
	西楠崎	90戸	28戸	31%
	大生院	47戸	17戸	36%

3. 基礎的分析

(1) 調査概要

本研究で扱う避難行動データは、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⁷⁾。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西楠崎、東楠崎、唐津山、白浜、大生院の地区の住民の行動を対象としている。8月18日の台風による豪雨は、最大時間雨量が55mm/hr(11時～12時)に達し、新居浜市内の被害は、全壊が13棟、半壊が80棟、人的被害は死者3人、重傷1人であった。9月29日の台風被害は、大雨が長時間続き、28日～29日にかけての連続雨量は281mm、全壊が8棟、半壊が132棟、死者5人であった。調査対象地区の特徴は、白浜地区以外の4つの地区は100戸以下の小規模集落であり、白浜地区は比較的住宅が密集した市街地の中にある(表-1)。

避難行動データは、地区住民へのヒアリング調査により収集されている。これは、短時間に変化する災害状況と詳細な対応行動・協調行動を把握するためである。ヒアリング調査では時系列に沿った当日の一連の行動を収集し、誰とどのような協調行動を行ったかについても調査している。なお、同世帯内の協調行動は意識せずに行われており、ヒアリング調査で同世帯内での協調行動の有無や回数、実施時間等を把握することは難しい。そのため、ここでは世帯外の相手との協調行動のみを取り扱い、協調行動ネットワークのノードは世帯を1単位とする。

(2) 災害時に形成された協調行動の内容

災害時の行動内容の集計結果は次となる。図-2は調査で把握された災害時の行動を分類し、その構成割合を示している。「安否確認、救助援助、共同避難、情報を伝える、情報を聞く」が他世帯との協調行動に分類でき、災害時の行動の4割程度が協調行動となっている。次に、図-3は災害時の対応行動を行った個人が他世帯と協調行動を実施した回数の構成割合を示している。全体の3/4は協調行動を実施しているが、残りの

図-2 災害時の住民行動の構成割合（全地区）

図-3 協調行動回数の構成割合（災害時行動あり全個人）

1/4 は協調行動を実施していない。

本研究では協調行動の特徴の理解のため、協調行動ネットワーク形成モデルの導入を行うが、その際、協調行動を行わない世帯の形成確率（式(1)）は常に0となり、4章で行う適応度の推定の対象とできない。協調行動の特徴の理解のためには、協調行動を行わない孤立世帯の研究やそのための適応度モデルの拡張は重要な課題であるが、本研究では協調行動形成した世帯の行動の分析に対象を絞り、次節以降の議論を展開させていただきたい。

(3) 協調行動ネットワークの構造的特徴

今節以降では協調行動に着目した検討を行う。住民の避難行動データを用いて、協調行動ネットワークの構造的特徴についての基礎的分析を行う。前章で仮定した災害時のネットワークの構造的特徴であるクラスター性、平均距離、ハブノードと形成モデルの特徴であるネットワークのスケールフリー性の分析を行い、仮定の妥当性を検証する。

対象とするネットワークは、各地区で観察された協調行動ネットワークのうち、ネットワークサイズの大きい上位3つの連結ネットワークとする。これは、8

図-4 西楠崎地区の2つの協調行動ネットワーク

図-5 大生院地区の協調行動ネットワーク

月18日の災害時の西楠崎地区内の2つのネットワークと9月29日の災害時の大生院地区のネットワークである。西楠崎地区の2つの協調行動ネットワークは土石流災害を受けた側（以下、西楠崎土石ネットワーク）と溜池の下流にあった側のネットワーク（以下、西楠崎池ネットワーク）である（図-4）。西楠崎地区は、地区内にある小川で土石流が発生し、川の東西での行き来が不可能になり、地区が2つに分断された。そのため、2つの連結ネットワークが形成されている。もう1つは、大生院地区のネットワークである（図-5）。なお、図中の番号は地区内の世帯番号を示し、ノードは世帯、リンクは協調行動が世帯間で行われたことを示す。また、世帯は協調行動を行った世帯のみを示し、適応度モデルはリンク形成の方向は区別しておらず、ここでも無向グラフとしてネットワークを取り扱う。また、ノードの位置は住居の地理的な位置とは無関係である。

次に、ネットワークのサイズ、総リンク数、平均距離、クラスター係数、次数中心性は表-2となる。なお、ネットワークサイズと総リンク数はネットワークに含まれるノード数とリンク数を示す。距離は2つのノードを結ぶリンク数の最小値を示し、平均距離は全ノードの組み合わせペアの距離の平均である。ノード v_i のクラスター係数とは、そのノード v_i とリンクするノード同士でリンクがあるペアの割合を示し、ネットワー

表-2 連結ネットワークの基礎指標

ネットワーク	西楠崎 土石	西楠崎 池	大生院
ネットワークサイズ	23	12	15
総リンク数	27	11	23
平均距離	3.22	3.27	2.19
クラスター係数	0.11	0.00	0.54
次数中心性(最大ノード)	0.32	0.36	0.79

図-6 ネットワーク別次数分布

クのクラスター係数は全ノードのクラスター係数の平均である。また、次数中心性とは、そのノードの次数を持ちうる次数の最大値(ネットワークサイズから1を引いた数)で割った値であり、表-2ではネットワークの中で最大の次数中心性をもつノードの値を示している。

災害時の協調行動ネットワークの構造の仮定と同様に平均距離は短い。また、西楠崎地区土石ネットワーク、池ネットワークのクラスター係数は小さい。大生院地区の世帯13と世帯25は土砂崩れによる被災世帯であり、両世帯への救助活動が数多く行われたため、クラスター性は高い。また、全てのネットワークにおいて、次数中心性で0.3を超える値のハブノードが存在している。

次に、各ネットワークの次数分布は図-6となる。西楠崎土石ネットワークは直線近似の傾きが-1.25程度となる。また、あてはまりも比較的良好、スケールフリー性を示しているといえる。西楠崎池ネットワークは、ハブへのリンクの集中はやや小さい。逆に大生院ネットワークは、2つのハブノードにリンクが集中し、それ以外のノードは小さな次数となっており、傾きは緩やかである。この2つのネットワークの近似直線とあてはまりは、西楠崎土石ネットワークと比べてやや低い。

図-7 西楠崎土石ネットワークの形成過程

図-8 西楠崎池ネットワークの形成過程

図-9 大生院ネットワークの形成過程

(4) 協調行動ネットワークの形成過程

次に、協調行動ネットワークの形成過程について考察する(図-7, 図-8, 図-9)。赤線はその時間帯に形成された協調行動のリンク、黒線はその時間帯以前に形成された協調行動のリンクを示す。

西楠崎土石ネットワークの形成過程は、初期からネ

表-3 協調行動実施世帯間の距離に関する基礎指標

ネットワーク	西楠崎 土石	西楠崎 池	大生院
平均実距離	67m	74m	181m
標準偏差	57m	57m	120m
エリア範囲	300m×180m	230m×120m	430m×130m

図-10 協調行動形成の世帯間距離の構成割合

ットワークに加入している世帯 49 がリンクを順調に形成する一方で、途中から加入した世帯 12, 69, 90 や後半から加入した世帯 65, 78 も複数のリンクを形成しており、fit-get-rich 型のリンク形成過程となっている。世帯の行動内容の特徴としては、世帯 12, 90 は土石流災害を住宅に被り、協調行動が形成しやすくなっている。世帯 49 は情報伝達中心の協調行動、世帯 65, 69, 78 は近所での協調行動を行っている。次に、西楠崎池ネットワークの形成過程は、ネットワークに当初から加入している世帯 4 がどの時間帯も協調行動を形成している。この世帯は各時間帯で池の決壊に関する情報伝達を行っている。全体のネットワーク形成過程は、古株のノードがリンクを形成しやすい first-mover-advantage 型となっている。次に、大生院ネットワークの形成過程は、ネットワークに途中から加入した世帯 13, 25 にネットワーク全体のリンク数 24 本のうち 21 本が集中しており、winner-takes-all 型となっている。この二つの世帯は土砂崩れにより大きな被害を受けている。

(5) 協調行動形成における距離の影響

次に、協調行動形成と距離の関係を確認する。2. (5) で説明したように本研究では二者の関係性を考慮せずにマクロ的に現実には整合するネットワーク形成モデルの提案を行っている。一方で、一般的には協調行動の形成には二者の関係性が影響すると考えられる。そこで、本節では二者の関係性の中でも影響が大きいと想定される二者間距離の検討を行う。

まず、協調行動が形成された世帯間の平均実距離等の基礎指標は表-3 となる。次に、図-10 は協調行動を形成した世帯間の距離の構成割合を示す。西楠崎地区は 50m 以内の近い世帯との協調行動を形成しているが、大生院地区は 100m 以上離れた世帯と協調行動が半数程度となっているなど、離れた世帯との協調行動も見

られる。世帯間の距離が近いことが協調行動の形成されやすさに影響していると考えられる一方で、距離の影響を受けていない協調行動の形成も多く生じている。本モデルで二者間の距離を考慮しないことで、協調行動形成の重要な要因を捨象してしまっているとはいえない。

4. ネットワーク構造と形成過程

(1) 適応度の推定方法

本章では、西楠崎土石ネットワークのデータと適応度モデルを用いて、適応度の推定と災害時の協調行動ネットワーク形成過程の考察を行う。ここでは、その推定方法について説明する。

適応度モデルによるネットワークの形成過程は、単位時間に 1 つの世帯がネットワークに追加され、そのたびにリンクが形成される。式(1)より、各世帯の協調行動形成確率は、協調行動形成数や各時間帯の他の世帯のネットワーク加入/非加入によって影響を受ける。そのため、適応度の推定にあたって、ネットワークに追加される世帯の順序とその協調行動形成相手を定める必要がある。調査データでは世帯ごとに行動順序とその行動が行われた時間帯が把握されている。同じ時間帯に異なる世帯が行った行動はどちらが先に行ったかを比較することができない。そのため、協調行動の形成順序を一意に定めることはできない。協調行動データの形成順序の設定は、まず、協調行動形成の時間帯や各世帯の行動順序の情報から可能な範囲で協調行動形成順序を一意に定める。次に、これらの情報から順序が決定できない同時間帯かつ他世帯の協調行動の形成順序は、乱数により決定し、一連の協調行動形成順序を便宜的に定める。この方法で協調行動形成順序を 10 パターン形成し、これを 1 つのデータとして、世帯の適応度の推定を行う。適応度の推定には最尤推定法を用い、また対数尤度関数は次式となる。

$$\ln L = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{J(i)} d_{ij} \ln \frac{\eta_i k_i}{\sum_{j=1}^{J(i)} \eta_j k_j} \quad (11)$$

ここで t は時間を示し、また単位時間に 1 つの協調行動が形成されるとする(式(2)の m を 1 とする)。 T は全協調行動形成数と一致する。 $J(t)$ は時間 t で協調行動ネットワークに加入している世帯数を示す。 d_{it} は時間 t にネットワークに加入する世帯が協調行動形成相手として、世帯 i を選択した場合は 1、そうでない場合は 0 とする。また、ネットワークに加入してから 1 つも協調行動を形成しない場合(協調行動形成数が 1 となる世帯と疑似ノード)は、適応度は推定できない。そこで、適応度

表-4 適応度モデル推定結果

世帯	適応度 η	t値
12	4.30E-03	-27.74*
13	1.60E-03	-23.15*
14	8.09E-03	-22.22*
35	4.28E-03	-19.78*
41	2.40E-03	-24.75*
49	2.35E-03	-24.47*
59	2.60E-02	-9.89*
65	2.93E-02	-9.33*
67	5.37E-03	-18.86*
69	1.12E-02	-16.12*
70	1.45E-03	-18.00*
78	2.31E-02	-13.18*
87	9.48E-03	-12.88*
90	7.76E-03	-21.41*
次数1	9.12E-04	-
サンプル数		410
初期尤度		-1570
最終尤度		-1156
尤度比		0.26
修正済み尤度比		0.25

*は5% 有意

をあらかじめ十分小さい値として, $\exp(-7) \approx 9.12 \times 10^{-4}$ を与える. また, 新規ノード同士のリンク形成過程で利用する予めネットワークに付加する擬似ノードのリンク形成は, 次数0で行われるため, リンク形成確率を $(\eta k + \delta)\Delta$ として与える. なお, δ は 1×10^{-5} と十分小さな値とする.

この推定方法を用いて, 適応度の分布によってスケールフリー構造のネットワークが形成されることがわかっている first-mover-advantage 型の西楠崎池ネットワークと fit-get-rich 型の西楠崎土石ネットワークのうち, 適応度の推定可能な協調行動形成数が2以上の世帯数が多い西楠崎土石ネットワークを対象に適応度の推定を行う. 西楠崎池ネットワークは情報伝達を行う世帯4, 大生院ネットワークは被災した世帯13, 25が中心となり, ネットワークが形成されているのと比較し, 西楠崎土石ネットワークの形成過程はそれほど明確ではなく, 適応度の推定結果によるネットワーク形成過程の分析に適している.

(2) 適応度推定結果の考察

ネットワークの適応度の推定と, 適応度とネットワーク形成過程, ネットワーク構造の考察を行う.

まず, 適応度の推定結果は表-4となる. 修正済み尤度比は0.25となり, 推定された全ての適応度は, 次数1世帯の適応度よりも大きい.

次に, ネットワークの形成過程は適応度の分布に影響を受けるため, 適応度推定値の分散と形成過程の特徴を考察する. 適応度と次数に応じた理論的な形成過程と実データを用いた適応度推定値による形成過程の

図-11 適応度の分散の時間変化

図-12 形成確率10%以上の世帯数と確率最大値の推移

整合性を検証する. 図-11は横軸に協調行動ネットワークに追加された世帯番号を時系列に沿って並べ, 縦軸に各時間帯のネットワーク形成世帯の適応度の分散を示す. 図-12は横軸に時間経過をとり, 赤の折れ線グラフ(左縦軸と対応)はネットワーク内での協調行動形成確率が10%以上となる世帯数, 青の折れ線グラフ(右縦軸と対応)は協調行動形成確率が最大となる世帯の形成確率を示す.

まず, 土石流災害発生までは適応度の分散は小さく, first-mover-advantage 型のネットワーク形成過程となっている. 土石流発生後は, 適応度の分散は徐々に大きくなり, fit-get-rich 型のネットワーク形成過程となっている. 適応度の高い世帯69, 90等が協調行動を形成しやすい活性化された状態となっている. また, 協調行動形成数の多い世帯12も活性化されている. さらに, 11時以降は適応度の高い世帯78, 59, 65がネットワークに加入し, さらに分散が大きくなる. 適応度が大きい世帯が加入したものの, その後の協調行動形成数が少ないため, これらの世帯にはリンクが集中していない.

次に, 選択確率の大きい世帯数は主に3~4世帯の中に収まり, ネットワークの中で限られた世帯のみが協調行動を行いやすい状態になっている(図-12). 早い時間帯から比較的多くの協調行動を形成している世帯12や90が大半の時間帯で10%以上の形成確率となっており, 他の1~2つの活性化された世帯については, 各時間帯において適応度の高い世帯や協調行動形成数の多い世帯等が入れ替わっている. 協調行動形成確率

図-13 協調行動ネットワークの構造と適応度の分布

表-5 適応度と中心性, 協調行動開始時間

世帯	適応度 η	近接中心性	行動開始時間
12	0.004 (9)	0.43 (2)	9時
13	0.002 (13)	0.31 (10)	9時
14	0.008 (6)	0.48 (1)	9時
35	0.004 (10)	0.39 (5)	10時
41	0.002 (11)	0.34 (6)	9時
49	0.002 (12)	0.42 (4)	9時
59	0.026 (2)	0.31 (10)	13時
65	0.029 (1)	0.28 (13)	16時
67	0.005 (8)	0.34 (6)	10時
69	0.011 (4)	0.27 (14)	10時
70	0.001 (14)	0.32 (9)	9時
78	0.023 (3)	0.34 (6)	11時
87	0.009 (5)	0.31 (10)	11時
90	0.008 (7)	0.43 (2)	10時

※ ()内は他世帯との比較順位

の最大値は, ネットワーク内の世帯数が一定数以上となる10時以降は, 25%以下となっており, 少数の世帯に協調行動の形成が過剰に集中する状況とはなっていない. 後半からネットワークに加入した世帯であっても, 適応度が高ければ協調行動を形成しやすい状況になるが, そうした適応度が高い世帯のみに協調行動形成が集中する状況とはなっておらず, やはり協調行動ネットワークの形成過程はfit-get-rich型となっている.

次に, 適応度モデルにおいて, ノード固有の特性を表す指標である適応度と災害時の協調行動ネットワークの構造的な特徴を考察し, その関係性を明らかにする. なお, 図-13は適応度とネットワークの構造を示しており, 表-5は適応度と世帯の近接中心性, 行動開始時間の関係を示している. 近接中心性とは, 他のノードとの距離の平均の逆数である. 次数中心性が直接的なリンクのみを考慮した中心性であるのに対して, 近接中心性は直接的にはリンクしていないノードも含めたネットワーク全体を考慮した中心性である. そのた

め, 近接中心性をネットワーク全体の構造との関係の比較に用いる.

適応度の小さい世帯13, 41, 49, 70は, 早いタイミングで救助や避難の協調行動を行い, そのまま救助活動が続ける, もしくはそのまま避難している. 適応度が中位である世帯12, 35, 67, 69, 87, 90は災害前後に情報収集活動・救助活動を行い, また救助活動終了後に避難行動を行っており, 時間をあけて複数回の協調行動をしている. また, これらの世帯の多くは高い近接中心性をもち, ネットワークの構造的な中心となっている. 次に, 適応度の高い世帯59, 65, 78は, 災害発生後のしばらく時間が経ってから協調行動を行っている. 構造的には協調行動形成数が少ない世帯をネットワークと連結させるブリッジ機能を担っており, 具体的な協調行動としては, 共同での避難行動を行っている. 適応度が中位の早期から協調行動を行っている世帯は地区の中でネットワークの中心を担っているが, そうした世帯だけでは地区内の一部の世帯との協調行動が形成されない. 適応度の高い世帯がそうした協調行動形成の少ない世帯をカバーして協調行動を行う役割をしており, こうした働きをする世帯が災害時ににおいて必要であることが伺える.

これらより, 適応度の大小は協調行動を行う時間帯と協調行動形成数との兼ね合いで決まっているため, 必ずしも適応度の高い世帯がネットワークの構造的な中心となっていないことがわかる. 適応度の大小と構造的な特性との関係性の解明は今後の課題といえる. また, 本研究では救助行動を含め全ての協調行動を同様に扱っているが, 前章と本節の前半部分で示したように, 救助行動のある西楠崎土石ネットワークはfit-get-rich型, 救助行動が中心の大生院ネットワークはwinner-takes-all型, 救助行動のない西楠崎池ネットワーク, 土石流災害発生前の西楠崎土石ネットワークはfirst-mover-advantage型の形成過程となり, どの場合でも適応度モデルと整合している. fit-get-rich型とfirst-mover-advantage型の形成過程は同じスケールフリー構造のネットワークとなるのだが, 救助行動を含めた協調行動ネットワーク(fit-get-rich型)は, 救助行動がない場合と比べれば救助以外の協調行動の形成割合は小さくなる. これは, 避難関連の協調行動が十分に行われていない可能性を示しており, 避難行動と救助行動を同時に行うための対策が必要とも考えられる.

5. おわりに

(1) 研究の成果

本研究では, 災害時避難の中では欠かせない他者と

の協調行動に着目し、住民間の協調行動ネットワークの形成過程に複雑ネットワーク形成モデルの導入を試みた。また、実際の災害時行動データにモデルを適用し、災害時の住民の協調行動形成に関する実証分析を行った。本研究の成果を以下に示す。

- (ア) 個人の状態変数とその分布（場の状態を示す）により、災害時の協調行動ネットワークのマクロ的特徴を再現できる適応度モデルを導入した。集落の規模が大きくても、二者の関係性を扱わないためにデータ量が過剰とならずに、個人特性を考慮した協調行動のシミュレーションが可能となる。
- (イ) 実行データを用いて適応度モデルの検証を行い、災害時の協調行動ネットワークの構造がスケールフリー性をもつことを確認した。災害時の情報伝達において、速達性や頑健性、非重複性の点で優れたスケールフリーネットワークの特性を踏まえた避難行動計画の立案が有効となると考えられる。
- (ウ) 適応度モデルを現実利用可能な拡張を行い、適応度の推定やその分散とネットワーク形成過程の分析を行う枠組みを提示した。モデルは、発展系として、適応度を個人特性のパラメータで表現することや適応度の分布を地区特性や災害状況と関連させることが可能であり、協調行動形成の解明に寄与しうると考える。
- (エ) 推定した適応度を用いて、協調行動を行いやすい活性化された世帯数が時間帯によらず不変であることを確認した。また、活性化された世帯は時間帯によって入れ替わり、ネットワークの構造中心となる長い間協調行動を行う世帯に加えて、後から協調行動を行う適応度の高い世帯もネットワークの連続性確保の点で重要になっていた。こうした補助的な世帯が計画上有効となると考えられる。

(2) 今後の課題

実証・実践面の課題は、まず、本研究で扱った対象地区や事例数は少なく、今後は分析対象を増やし、協調行動形成の特徴や分析手法を検証する必要がある。また、成果(ア)の適応度モデルを用いた行動シミュレーションの実施には、地区内の協調行動形成数や協調行動形成時間・順序の設定が必要である。適応度モデルにおいて1つのネットワークが形成されるとする範囲の検討も必要である。これらの地域や災害に応じた傾向の把握も課題となる。また、リスク・コミュニケーション等による実践的な対策への展開には、日常での意識等と適応度との関係性の分析が必要であり、成果(ウ)で示した詳細なパラメータの推定が求められる。

次に、適応度モデルの理論的な課題として、避難計画立案の場面では災害時に救助や援助等の協調行動を

受ける必要が高い人をどう助けるのかを計画する必要がある。協調行動の発受の方向性を考えたモデルに拡張する必要がある。また、ネットワークに加入しない世帯、つまり災害時に協調行動を行っていない世帯は取り扱えない。災害時には協調行動を形成していない世帯にも危険が及ぶ可能性があり、協調行動を行わない世帯を含めた検討も必要である。

謝辞：本研究の避難行動データは、2004年当時の愛媛大学大学院の中川周郎氏、南信治郎氏、升田智美氏をはじめとした都市環境計画研究室防災グループにより収集された。その際は、新居浜市の多数の被災者の方々に協力いただいた。また、本論文の修正にあたって匿名の査読者からの有用なコメントを参考とさせていただいた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 林亜夫, 橋本昭洋, 渡辺伸明, 友利洋: 避難シミュレーターによる避難施設整備計画の評価, 日本都市計画学会論文集, Vol. 17, pp. 565-570, 1982.
- 2) 高埴琢馬, 椎葉充晴, 堀智晴: 水害避難行動のミクロモデルシミュレーションと制御に関する研究, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 15-25, 1995.
- 3) 岡部慶三, 廣井脩, 三上俊治, 山本康正, 池田謙一, 宮田加久子: 1982年7月長崎水害における住民の対応, 東京大学新聞研究所「災害と情報」研究班, 1984.
- 4) 本間基寛, 片田敏孝: 津波防災における災害事前情報と住民避難の関係に関する考察, 災害情報学会誌, No. 6, pp. 61-72, 2008.
- 5) 山田昌和, 織田澤利守: 災害避難時における群集行動形成メカニズムのモデル化とその厚生分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 34, CD-ROM, 2006.
- 6) 中島悠, 椎名宏徳, 服部宏充, 八槨博史, 石田亨: マルチエージェントシミュレーションを用いた避難誘導実験の拡張, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 6, pp. 1954-1961, 2008.
- 7) 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. 31, CD-ROM, 2005.
- 8) 浦田淳司, 羽藤英二: 信頼とコミットメントの概念を導入した災害時における紐帯の生成モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 9) 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, 土木学会論文集, No. 625/IV-44, pp. 1-13, 1999.
- 10) 萩原良巳, 畑山満則: コミュニティの活性化・不活性化が災害時の情報伝達に及ぼす影響に関する研究, 京都大学防災研究所年報, Vol. 46B, pp. 61-66, 2003.

- 11) 浦田淳司, 羽藤英二, 災害時の社会的ネットワーク生成の巨視的特性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 40, CD-ROM, 2009.
- 12) 池田清宏, 河野達仁, 赤松隆, 柳本彰仁, 八巻俊二: 都市の集積・分散モデルの対象性破壊分岐: 群論的分岐理論によるアプローチ, 土木学会論文集D, Vol. 63, No. 4, pp. 553-556, 2007.
- 13) Candia, J., Gonzalez, M. C., Wang, P., Schoenharl, T., Madey, G. and Barabasi, A.-L.: Uncovering individual and collective human dynamics from mobile phone records, *Journal of Physics A, Mathematical and Theoretical*, Vol. 41, No. 22, article No. 224015, 2008.
- 14) Arabie, P., Boorman, S. A. and Levitt, P. R.: Constructing blockmodels: How and why, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 17, pp. 21-63, 1978.
- 15) 例えば, Albert, R., Jeong, H. and Barabasi, A. L.: Diameter of the World Wide Web, *Nature*, Vol. 401, pp. 130, 1999.
- 16) Milgram, S.: The small world problem, *Psychology Today*, Vol. 22, pp. 61-67, 1967.
- 17) Barabasi, A. L. and Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol. 286, pp. 509-512, 1999.
- 18) Caldarelli, G., Capocci, A., De Los Rios, P. and Munoz, M. A.: Scale-free networks from varying vertex intrinsic fitness, *Physical Review Letters*, Vol. 89, No. 25, 258702, 2002.
- 19) Bollobas, B. and Riordan, O.: The diameter of a scale-free random graph, *Combinatorica*, Vol. 24, No. 1, pp. 5-34, 2004.
- 20) Albert, R., Jeong, H. and Barabasi, A.-L.: Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, Vol. 406, No. 6794, pp. 378-382, 2000.
- 21) Bianconi, G. and Barabasi, A. L.: Competition and multiscaling in evolving networks, *Europhysics Letters*, Vol. 54, No. 4, pp. 436-442, 2001.
- 22) Barrat, A. and Pastor-Satorras, R.: Rate equation approach for correlations in growing network models, *Physical Review E*, Vol. 71, article No. 036127, 2005.
- 23) Bianconi, G. and Barabasi, A. L.: Bose-Einstein condensation in complex networks, *Physical Review Letters*, Vol. 86, No. 24, pp. 5632-5635, 2001.

(2011. 11. 7 受付)

A STUDY ON THE RESIDENTS' COOPERATION BEHAVIORS UNDER THE TYPHOON DISASTERS BY A COMPLEX NETWORK FORMATION MODEL

Junji URATA and Eiji HATO

In recent years, evacuation behaviors with other people have attracted much attention. The purpose of this study has been modeling of process of the residents' cooperation behaviors. The modeling follows from the fitness model which deals with the processes of all residents' cooperation behaviors while taking the macroscopic approach.

We develop the fitness model to clarify the cooperation behaviors under the typhoon disaster in the city of Niihama in 2004 by making an empirical analysis and validate the network formations and structures of the proposed model. The proposed model implies that the choices of the people to cooperate are affected by personal characters and the numbers of cooperation behaviors at that time.