



豪雨災害時下の 空間特性の推移を考慮した 住民間協調行動ネットワーク形成モデル

浦田淳司

(東京大学大学院博士後期課程)

2013.03.31 (Sun)

目的・背景：協調行動の重要性

災害時下行動

でね、あそこの2階の家、あそこ親がなしになってね、嫁さんが、娘がね、東京から新盆に来てたんよ。~~そしたら、荷物入れたら、もう下りれんのじゃいうて、あそこから手を振りよったけどね、皆、近所の人^{近所の人}がロープ投げたけど恐いいうてね。~~

出てくれ言うてしたって、お父さん足痛いけん、ここでええ言うて。~~あそこへ行ってきて、男の人来てもろうてあげる言うて。そしたら言うてくれたんよ。なら男の人が来てくれてね。お父さんが電動で、その人がさしかけてくれたの。

近所の人を助ける／一緒に避難をする／近所の人に知らせるetc

⇔東日本大震災：助けることで命を失った人・助けられた人

▶ 協調行動の重要性・脆弱性

防災施策

ハード防災 + ソフト防災

防波堤／堤防／ダム 避難計画／防災まちづくり／災害時要援護者避難支援

▶ 災害時の避難の促進・共助の役割

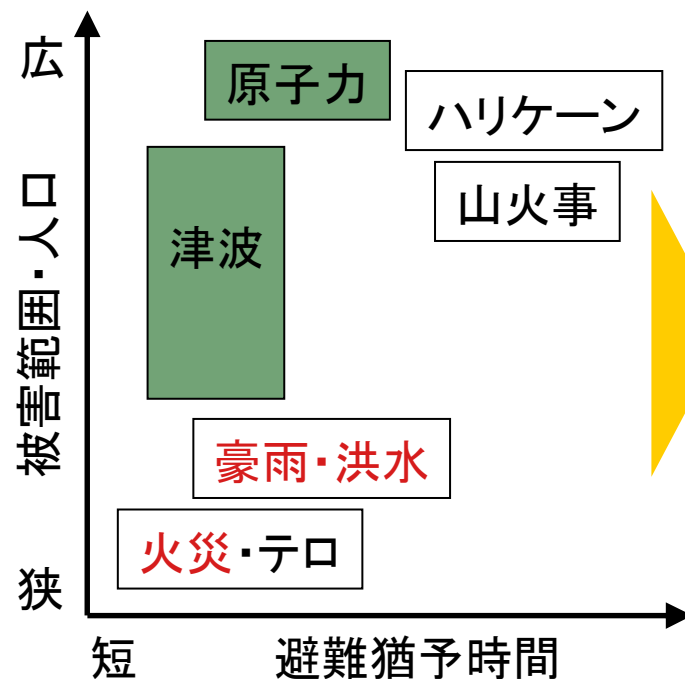
目的・背景：マクロアプローチ

■災害時行動研究の既存アプローチ

個人(間)を考慮した行動理解<ミクロアプローチ>

個人意識・経験, 情報の入手先・獲得数, 日常での関係性

行動予測のための細緻な情報収集は限界もある



<マクロアプローチ
の導入>

- ・ 協調行動全体をネットワークグラフと捉える
- ・ 個人のミクロ情報を縮約
- ・ 縮約した情報から再現する行動

目的・背景：個の選好と全体からの作用

相互協調—高齢者援助

全体協調作用



シンプルな相互関係で表せない協調行動

複雑な判断をもつ個の意思決定
全体の中での個の意思決定

相互協調作用＋全体協調作用
→全体としての複雑性を捉える

複雑ネットワークモデルの導入

* G. Bianconi, A.-L. Barabasi(2001)

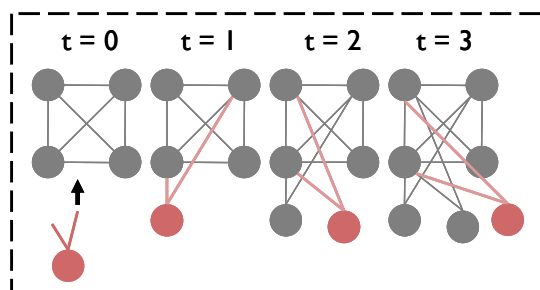
▼マイクロ情報の縮約と優先的選択メカニズム

リンク数とノード固有の適応度が大きい ⇒ 新しいリンクを得やすい

設定 ノード v_i が
リンクを得る確率

$$\Pi(v_i) = \frac{m\eta_i k_i}{\sum_{j=1}^n \eta_j k_j}$$

k : リンク数
 η : 適応度
m : 追加ノードの
リンク数(=1)



災害時のネットワーク形成

合理的な協調行動形成相手選択

世帯の特徴による差異

適応度モデルの枠組み

優先的選択メカニズム

ノード固有の適応度

複雑ネットワークモデルの導入

* G. Bianconi, A.-L. Barabasi(2001)

▼ネットワーク複雑性の再現可能性

リンク獲得確率

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \prod(k_i) = \frac{m \eta_i k_i}{\sum_{j=1}^n \eta_j k_j}$$

時刻tで次数kとなる頂点の確率分布

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

$\rho(\eta)$ の分布によって複雑性（スケールフリー）をもつネットワークになる

スケールフリー則： $P(k) \propto k^{-\gamma}$

一次数kのノードの存在確率P(k)がkのべき乗に比例

災害時のネットワーク形成

協調行動の疎密，複雑性

適応度モデルの枠組み

スケールフリー構造

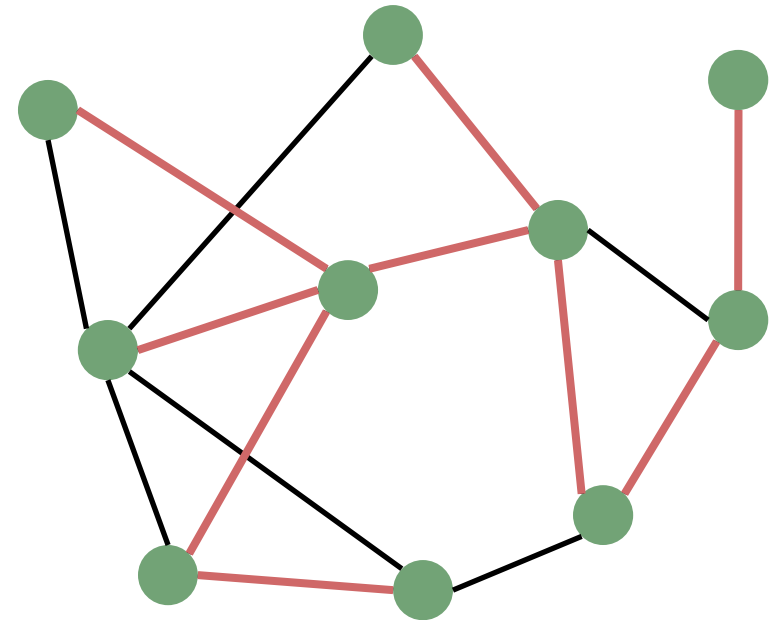
スケールフリーネットワークの意味

形成過程

《日常ネットワーク》
ランダムネットワーク
関・推移性の存在

《災害時紐帯生成》
緊急的・必要最低限の紐帯
ネットワーク制約が生死を支配

《災害時ネットワーク》
スケールフリーネットワーク
ハブ機能を持つノードの出現
集落内伝達速度の維持



構造的特徴

平均距離が短い

頑健性が高い

防災・減災面での価値

情報伝搬の素早さ

ノードが欠けても連続

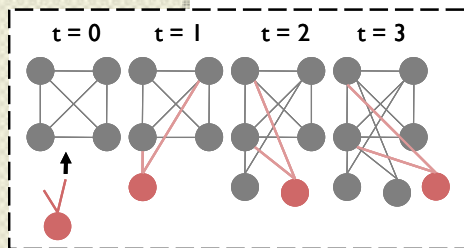
スケールフリー性の証明

A. -L. Barabasi, R. Albert: Emergence of scaling in random networks, Science, Vol.286, pp. 509-512, 1999

G. Bianconi, A. -L. Barabasi: Competition and multiscaling in evolving networks, Europhysics Letters, Vol.54, No. 4, pp. 436-442, 2001

G. Bianconi, A. -L. Barabasi: Bose-Einstein condensation in complex networks, Physical Review Letters, Vol.86, No. 24, pp. 5632-5635, 2001

▼ルール1：ネットワークの成長



ノード追加 ⇒ ネットワークが時間とともに成長

設定 毎時, ひとつのノードがネットワークに追加
新しいリンクをm本もつ

▼ルール2：優先的選択

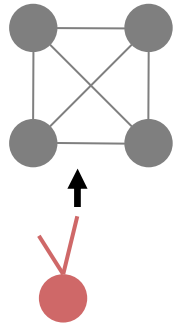
リンク数と適応度が大 ⇒ 新しいリンクを得やすい

設定 ノード v_i が
リンクを得る確率

$$\Pi(v_i) = \frac{m \eta_i k_i}{\sum_{j=1}^n \eta_j k_j}$$

リンク獲得確率

▼リンク獲得確率



$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \prod(k_i) = \frac{m \eta_i k_i}{\sum_{j=1}^n \eta_j k_j} \quad (\text{A2})$$

(η は各ノードに確率密度分布 $\rho(\eta)$ で付与)
 (全ての η が等しいときが、BAモデルに対応)

▼次数 k の仮定

$$k_{\eta_i}(t, t_0) = m \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\beta(\eta_i)} \quad (\text{A3})$$

(流入時間 t_0)

(時間 $t=t_0$ のとき, $k=m$)

$$\left[\begin{array}{l} 0 < \beta(\eta) < 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} 0 < \beta(\eta) \\ \beta(\eta) < 1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{—時間}t\text{ともに, 次数}k\text{増加} \\ \text{—獲得リンクは毎時}1\text{以下なので, }t\text{より増分は小} \end{array} \end{array} \right]$$

分母の近似

(A2)式の分母を近似

$\rho(\eta)$ は η の確率密度分布

$$\sum_j \eta_j k_j \cong \bar{\eta} \sum_j k_j \cong \int d\eta \eta \rho(\eta) \int_1^t dt_0 k_\eta(t, t_0)$$

(A3)式より

$$= \int d\eta \eta \rho(\eta) \cdot m \frac{(t - t^{\beta(\eta)})}{1 - \beta(\eta)} \quad (\text{A4})$$

$0 < \beta(\eta) < 1$ より

$$\left\langle \sum_j \eta_j k_j \right\rangle \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} C m t \quad (\text{A5})$$

$$C = \int d\eta \rho(\eta) \frac{\eta}{1 - \beta(\eta)} \quad (\text{A6})$$

β の導出

(A2)式に(A5)を代入

$$\frac{\partial k_{\eta}}{\partial t} = \frac{\eta_i k_i}{Ct} \quad (\text{A7})$$

(A3)式より

$$\frac{\partial k_{\eta}}{\partial t} = \frac{m\beta(\eta)}{t_0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\beta(\eta)-1} = \frac{\beta(\eta)}{t} k_{\eta}$$

(A7)式と比較して

$$\beta(\eta) = \frac{\eta}{C} \quad (\text{A8})$$

このとき、Cは(A6)式より

$$1 = \int d\eta \rho(\eta) \frac{1}{C/\eta^{-1}} \quad (\text{A9})$$

を満たす必要がある

kの確率分布P(k)

(A3), (A8)より, k以上となる累積確率分布は

$$k_{\eta}(t) > k \Leftrightarrow m \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{\eta}{C}} > k \Leftrightarrow t_0 < t \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{C}{\eta}}$$
$$P(k_{\eta}(t) > k) = P \left(t_0 < t \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{C}{\eta}} \right) = t \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{C}{\eta}} \quad (\text{A10})$$

(A10)より, 次数kとなる確率分布は

$$P(k) = - \int_0^{\eta_{\max}} d\eta \rho(\eta) \frac{\partial P(k_{\eta}(t) > k)}{\partial k}$$
$$= \int d\eta \rho(\eta) \frac{Ct}{\eta k} \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{C}{\eta}} \propto \int d\eta \rho(\eta) \frac{C}{\eta} \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{C}{\eta} + 1} \quad (\text{A11})$$

まだスケールフリーとは言えない

適応度 η の確率分布

次数のスケールフリー性 \rightarrow 適応度 η の分布 $\rho(\eta)$ 次第

Case 1 $\rho(\eta) = \delta(\eta - 1)$ (η が全て等しいとき)

$$\begin{aligned} \text{(A9)より } C=2 & \\ \text{(A8)より } \beta=1/2 & \Rightarrow \text{(A11)より } P(k) \propto k^{-3} \end{aligned}$$

Case 2 η が一様分布 $[0, 1]$ のとき

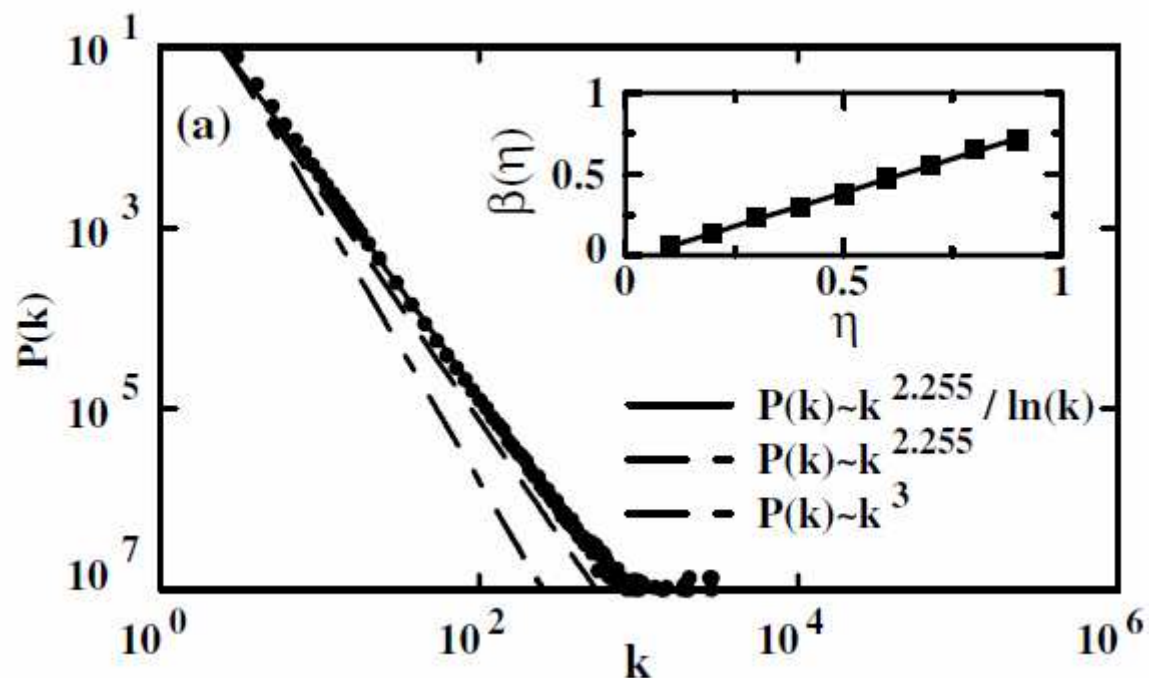
$$\text{(A9)より } 1 = \int_0^1 d\eta \frac{1}{C/\eta^{-1}} = [-C \log|\eta - C| - \eta]_0^1$$

$$\exp(-2/C) = 1 - 1/C \quad \text{(A12)} \quad (C^*=1.255)$$

$$\text{(A11)より } P(k) \propto \int_0^1 d\eta \frac{C^*}{\eta} \frac{1}{k^{1+C^*/\eta}} \approx \frac{k^{-(1+C^*)}}{\log(k)} \quad \text{(A13)}$$

べき乗と対数の逆数に比例

次数分布（両対数グラフ）



- $P(k) \sim k^{2.255} / \ln(k)$ は $P(k) \sim k^{2.255}$ に比べ、傾きゆるい
- ベキ則と比較し，“super hubs”が現れうる

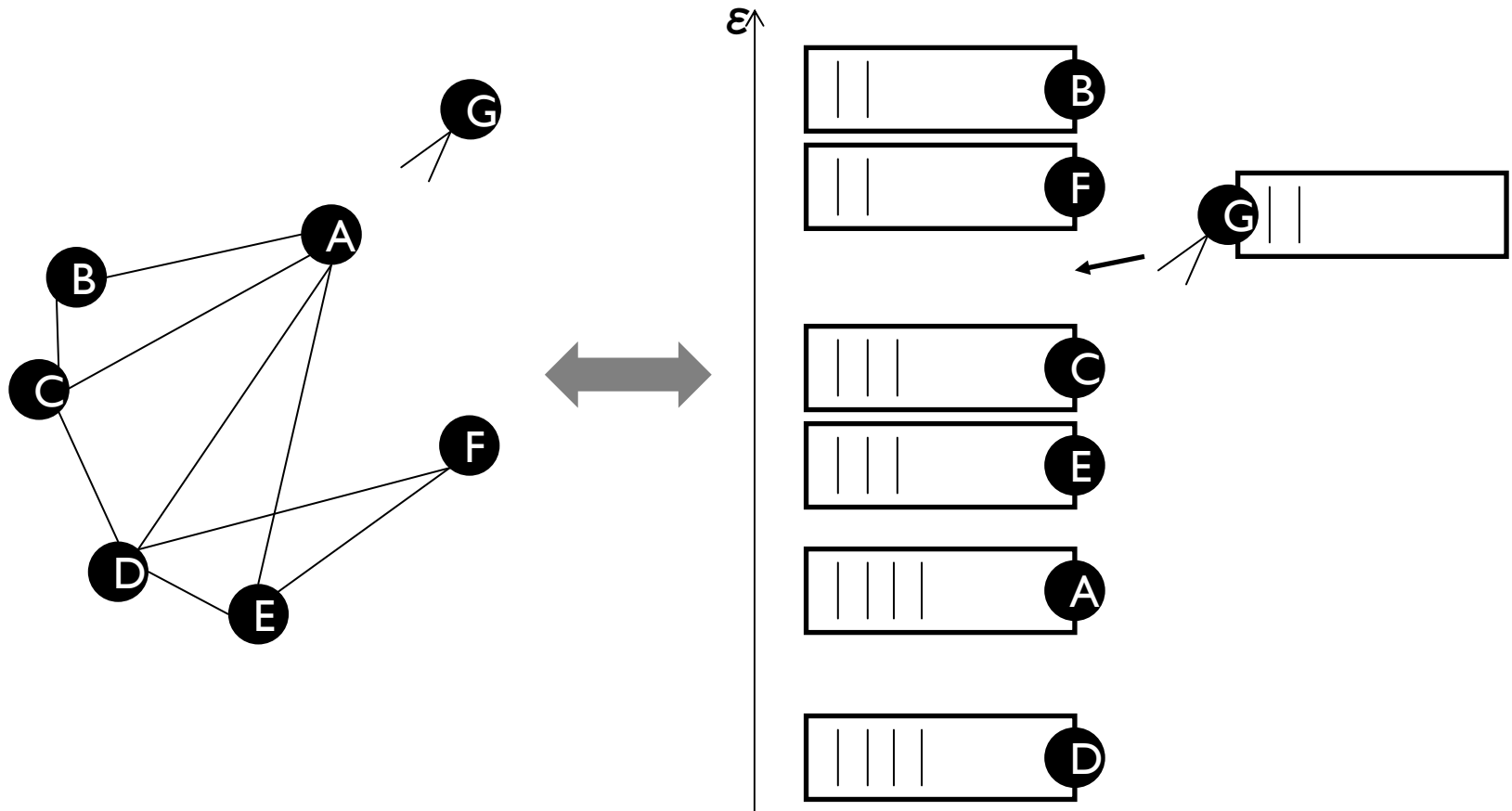
適応度 \Leftrightarrow 粒子エネルギー準位

適応度 η_i に粒子のエネルギー準位 ε_i を対応させる

$$\varepsilon_i = -\frac{1}{\beta} \log \eta_i \quad (\text{B2})$$

$$\eta_i = e^{-\beta \varepsilon_i}$$

ノードが準位, リンクが粒子に対応



リンク獲得確率(Bose)

(A2), (B2)より

$$\frac{\partial k_i(\varepsilon_i, t, t_{i0})}{\partial t} = m \frac{e^{-\beta\varepsilon_i} k_i(\varepsilon_i, t, t_{i0})}{Z_t} \quad (\text{B3})$$

$$Z_t = \sum_{j=1}^t e^{-\beta\varepsilon_j} k_j(\varepsilon_j, t, t_{j0}) \quad (\text{B4}) \quad \text{一分配関数}$$

次数は時間のべき乗に比例すると仮定 ((A3)と対応)

$$k_{\varepsilon_i}(t, t_{i0}) = m \left(\frac{t}{t_{i0}} \right)^{f(\varepsilon_i)} \quad (\text{B5})$$

η の確率密度分布 $\rho(\eta)$ に対して, ε の密度分布は,

$$g(\varepsilon)d\varepsilon = \rho(\eta)d\eta \Leftrightarrow g(\varepsilon) = \beta\rho(e^{-\beta\varepsilon})e^{-\beta\varepsilon}$$

式展開（ η と同様）

(A4)-(A6)と同様に

$$\langle Zt \rangle = \int d\epsilon g(\epsilon) e^{-\beta\epsilon} \int_1^t dt_0 k(\epsilon, t, t_0) = mz^{-1}t \quad (\text{B6})$$

$$\frac{1}{z} = \int d\epsilon g(\epsilon) \frac{e^{-\beta\epsilon}}{1-f(\epsilon)} \quad (\text{B7})$$

化学ポテンシャル μ を次のようにおく

$$e^{-\beta\mu} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle Zt \rangle}{mt} = z \quad (\text{B8})$$

(A5), (A8), (B6)より, $f(\epsilon) = \beta(\eta)$ なので

$$f(\epsilon_i) = \frac{mte^{-\beta\epsilon_i}}{Zt} = e^{-\beta(\epsilon-\mu)} \quad (\text{B9})$$

(B7), (B9)より,

$$I(\beta, \mu) = \int d\epsilon g(\epsilon) \frac{1}{e^{\beta(\epsilon-\mu)} - 1} = 1 \quad (\text{B10})$$

凝縮過程

ネットワークのリンクがボーズ気体（理想気体）であると考え、 $n(\varepsilon)$ を粒子密度とすると、

$$\int d\varepsilon g(\varepsilon)n(\varepsilon) = 1 \quad (\text{B11})$$

(B10)より、

$$n(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon-\mu)} - 1} \quad (\text{B12})$$

(B5), (B6), (B9)が成立 \Leftrightarrow (B10)の μ が存在

$$I(\beta, \mu) = \int d\varepsilon g(\varepsilon) \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon-\mu)} - 1} \leq I(\beta, 0)$$

if $I(\beta, 0) < 1$ β , $g(\varepsilon)$ の解なし

\Rightarrow ベキ分布の仮定が不成立 (B5)

一部の粒子が最低エネルギー準位に凝縮と考える

η の分布とスケールフリー性

G. Bianconi, A.-L. Barabasi(2001)より

▼ first-mover-advantage型

適応度 η が全て等しい場合 $\rho(\eta) = \delta(\eta - 1)$ (9)

⇒ スケールフリー構造をもつ $p(k) \propto k^{-3}$

形成確率はリンク数にのみ比例 ⇒ **古株のノードが優位**

▼ fit-get-rich型

適応度 η が $[0, 1]$ の一様分布 ⇒ スケールフリー構造

$$\rho(k) \propto k^{-2.255}$$

形成確率は適応度, リンク数に比例

⇒ **リンク形成数大, 適応度大が優位**

▼ winner-takes-all型

適応度 η が大きなノードが存在 ⇒ リンクが集中

→ **適応度大ノードが一人勝ち**

実証にむけた拡張

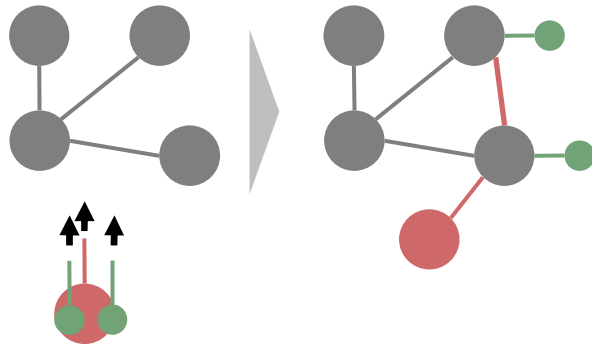
●災害時のネットワーク成長過程

適応度
モデル

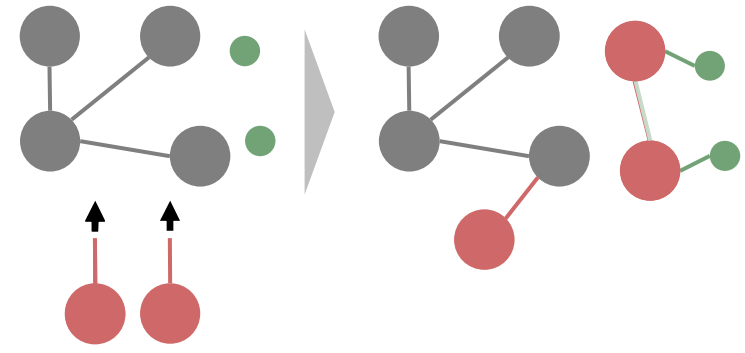
新ノードを既ノードに連結させる

実際の
ネット
ワーク
形成

既ノード間の連結



新ノード間の連結



次数1の擬似ノードの導入

適応度 η の推定と形成過程の考察



○ ケーススタディ
～2004年新居浜土砂災害事例から～

2004年 新居浜土砂災害

2004年8月18日の新居浜集中豪雨と9月29日台風21号災害により，大きな被害

8.18新居浜集中豪雨

	世帯	人
全壊	13	29
半壊	80	189
一部損壊	48	116
床上浸水	339	824
床下浸水	982	2529
死者		3
重症		1



愛媛県新居浜市郷地区(楠崎川) 死者1名、全壊8戸、半壊3戸

9.29台風21号災害

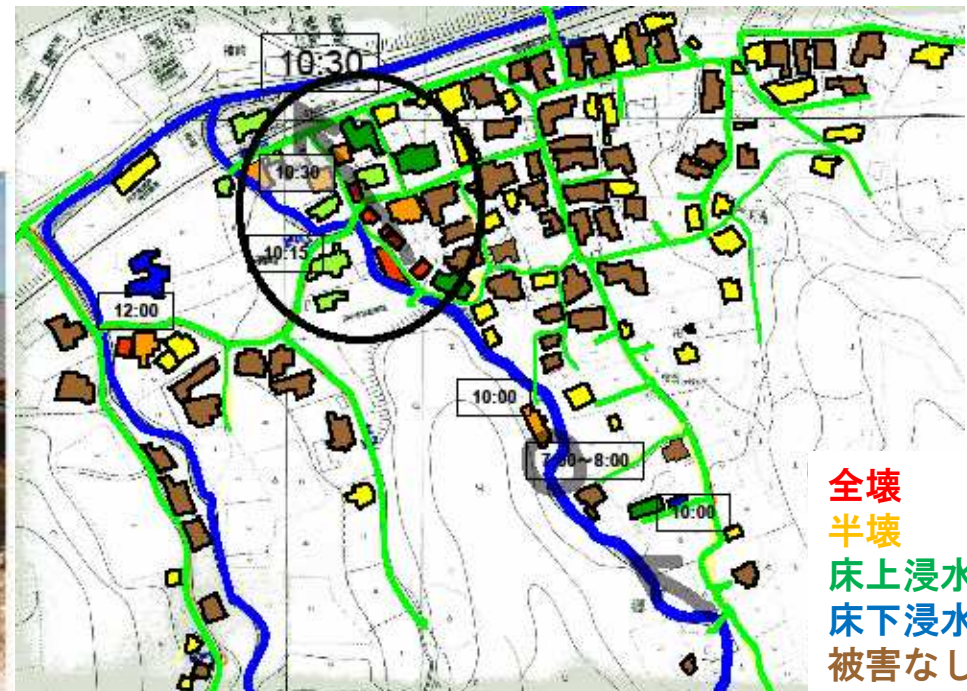
	世帯	人
全壊	8	15
半壊	132	251
一部損壊	230	490
床上浸水	900	2160
床下浸水	1200	2930
死者		5
重症		0



写真：平成16年に発生した土砂災害（国交省砂防部）

●西楠崎地区被害状況

土石流発生，死者1名（8月18日）



全壊
半壊
床上浸水
床下浸水
被害なし

調査内容

▼ヒアリング調査

- 二人一組で対象地域の世帯を訪問。会話することにより、調査項目を聞き取り
- あわせてビデオカメラで音声を録音→テキスト化

● 調査内容

- **活動内容（日常活動、仕事、電話、訪問、救助、避難、見るetc）**
- **活動開始・終了時間（信頼度つき）**
- **場所、交通手段、情報内容、災害認識 etc**

● データ特徴

- ヒアリングにより、**リアリティの高いデータ**
- **世帯間ベースの情報伝達を表現**
- **ヒアリング未実施世帯もある**

ヒアリング実施世帯数

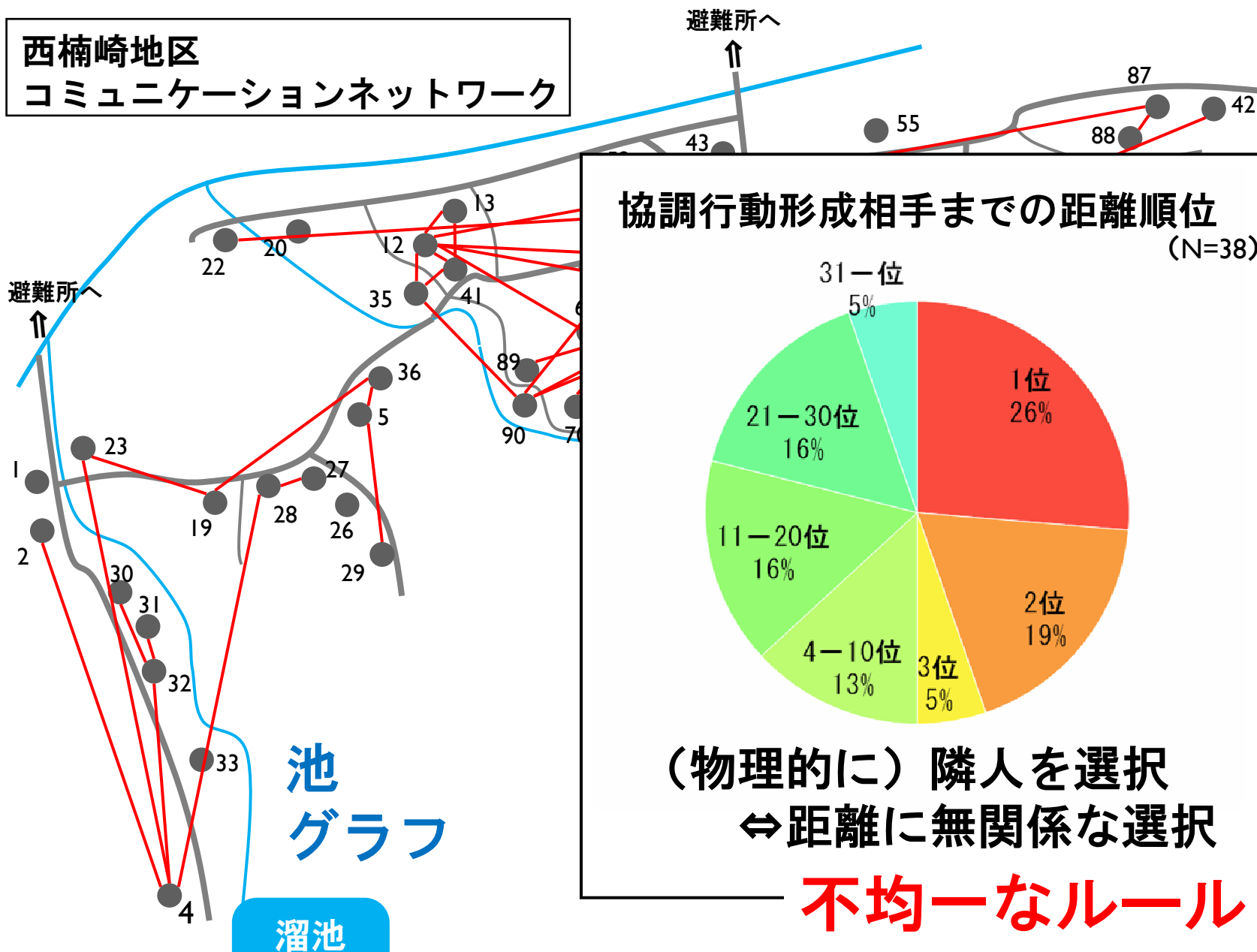
調査対象	集落	調査世帯数
8月18日	西楠崎	49
	東楠崎	9
	白浜	63
	唐津山	6
9月29日	西楠崎	28
	大生院	17
計		172

▼アンケート調査

- **訪問配布郵送回収（郷地区，多喜浜地区対象）**
- **属性，被害，連絡，避難形態**
- **回収率33%（8/18 56部，9/29 18部）**
- **アンケート世帯とヒアリング世帯は一致していない**

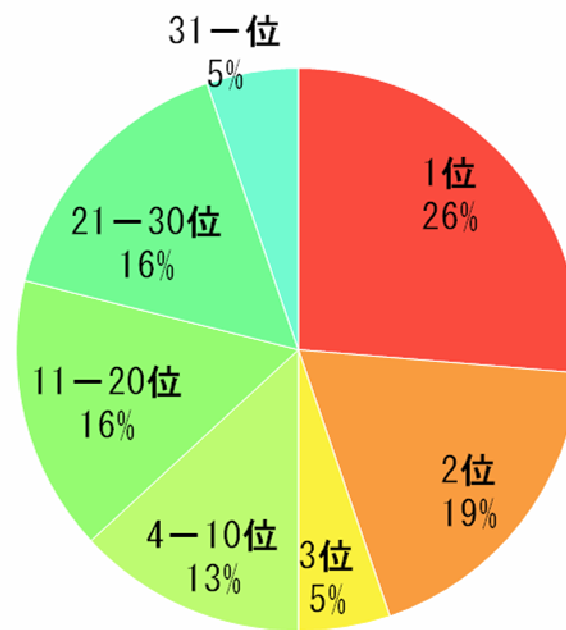
協調行動形成相手の選択

西楠崎地区
コミュニケーションネットワーク



協調行動形成相手までの距離順位

(N=38)

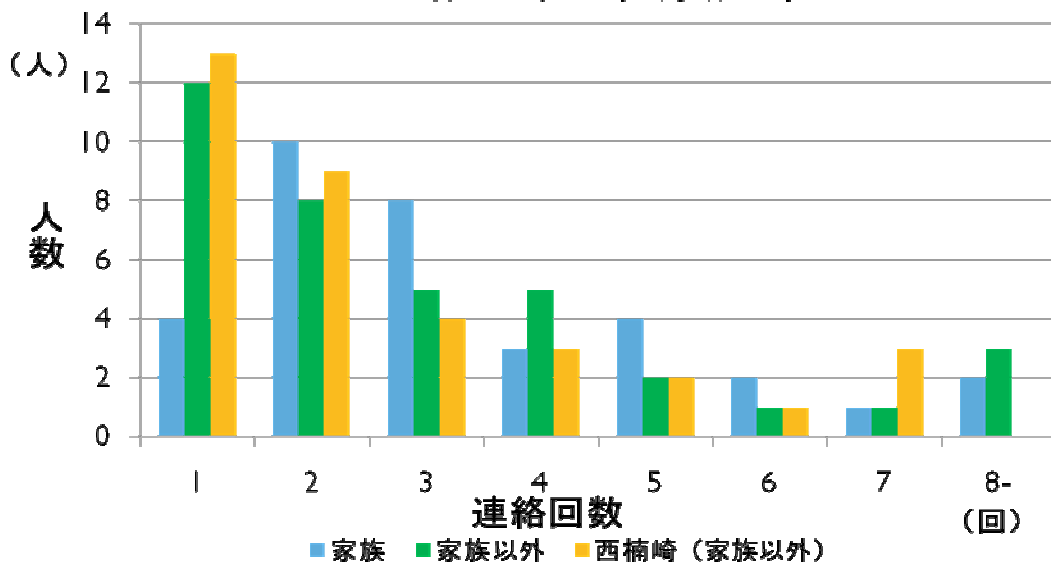


(物理的に) 隣人を選択
⇔ 距離に無関係な選択

不均一なルール

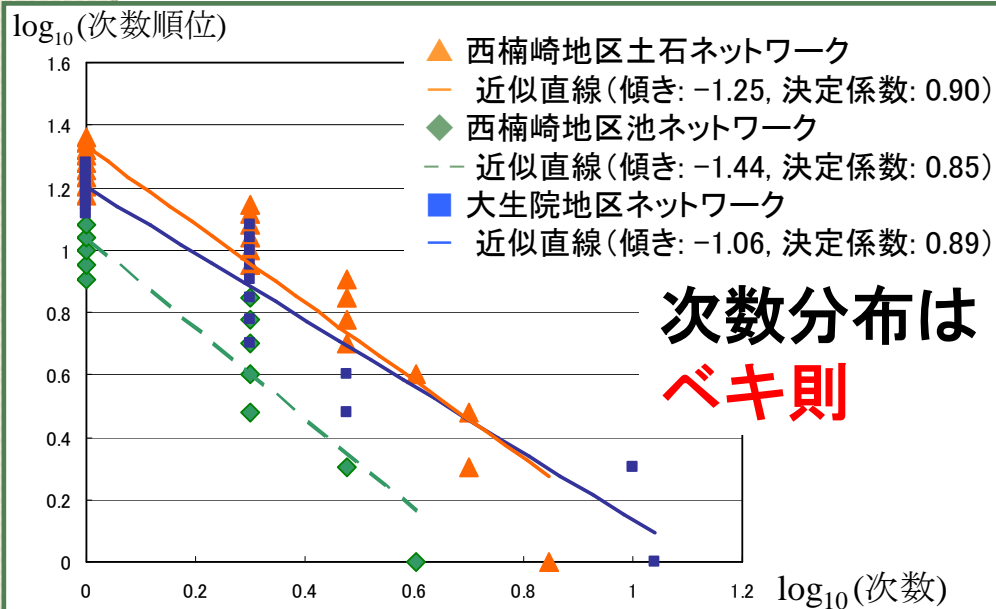
協調行動形成数の分布

連絡回数の頻度分布



連絡多一人数少

同じ地域内で
協調行動の密と疎
(ハブ性)



次数分布は
べき則

不均一なルール
協調行動の密と疎

巨視的状态
スケールフリー性

適応度モデルの導入

適応度 η の推定結果(I)

●リンク獲得確率

$$P_i = \prod (v_i) = \frac{\eta_i k_i}{\sum_{j=1}^n \eta_j k_j}$$

$$\eta_i = \exp(x_i) \quad \eta_i > 0$$

η_i : 適応度, x_i : パラメータ

ノード追加ごとに選択

●最尤推定法により, η を推定

$$\ln L = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{J(t)} d_{it} \ln \frac{\eta_i k_i}{\sum_j^{J(t)} \eta_j k_j}$$

次数1のノード:

リンク獲得なし $\Rightarrow \eta = 0.001$ を与える

非連結グラフ用の擬似ノード:

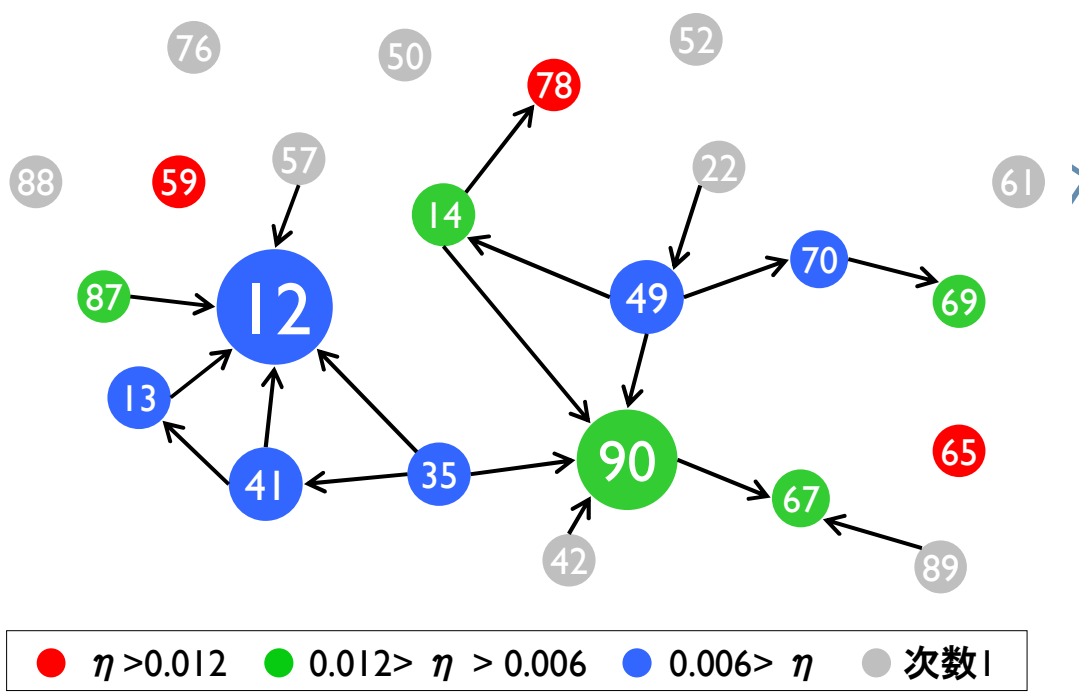
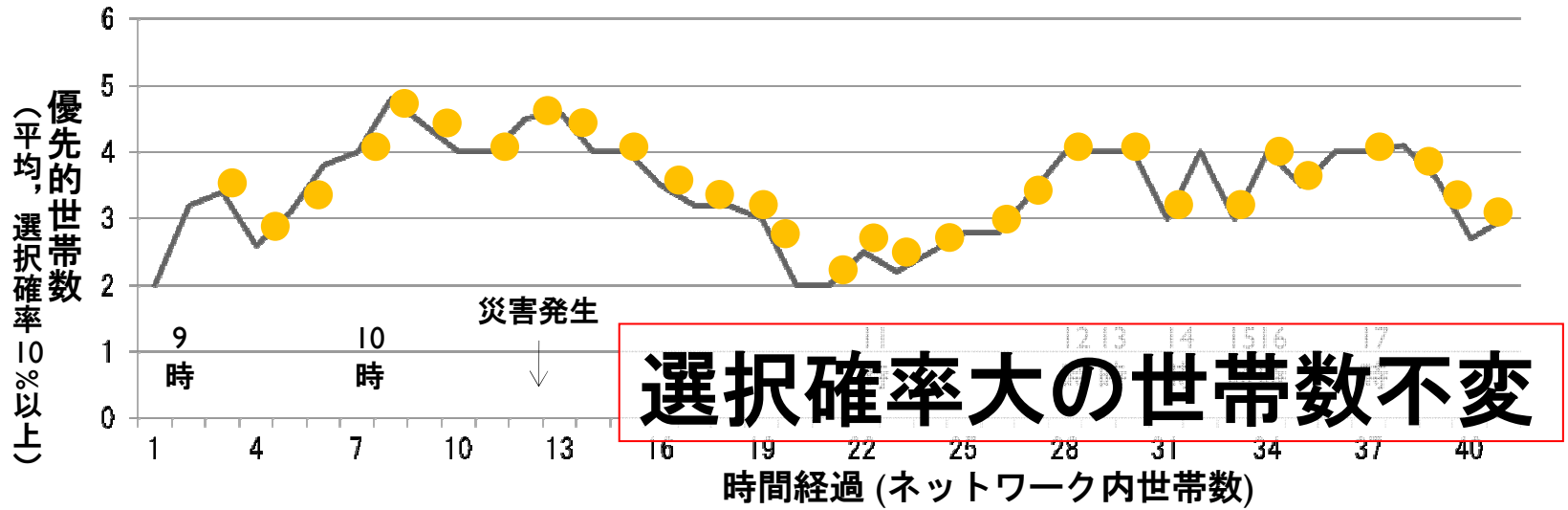
$t=0$ から存在, 選択確率: $(\eta k_{t+1} * E-05) / \Sigma$

✓ノード13, 70の被救助ノードを除き, 次数1ノードの η より, 大きい値を持つ

ノードNo	適応度 η	t 値
12	2.05E-03	-29.85*
13	4.79E-04	-20.97*
14	4.13E-03	-23.85*
35	2.31E-03	-22.05*
41	1.30E-03	-27.06*
49	1.37E-03	-26.43*
59	1.33E-02	-11.79*
65	1.42E-02	-11.32*
67	3.11E-03	-20.84*
69	5.41E-03	-18.77*
70	8.49E-04	-19.52*
78	1.14E-02	-15.77*
87	4.84E-03	-14.80*
90	3.79E-03	-22.88*
擬似ノード	2.84E-08	-0.48
次数1ノード	9.E-04	-
サンプル数		370
初期尤度		-1382.9
最終尤度		-1054.4
尤度比		0.24
修正済み尤度比		0.23

*は5%有意

協調ネットワーク形成過程



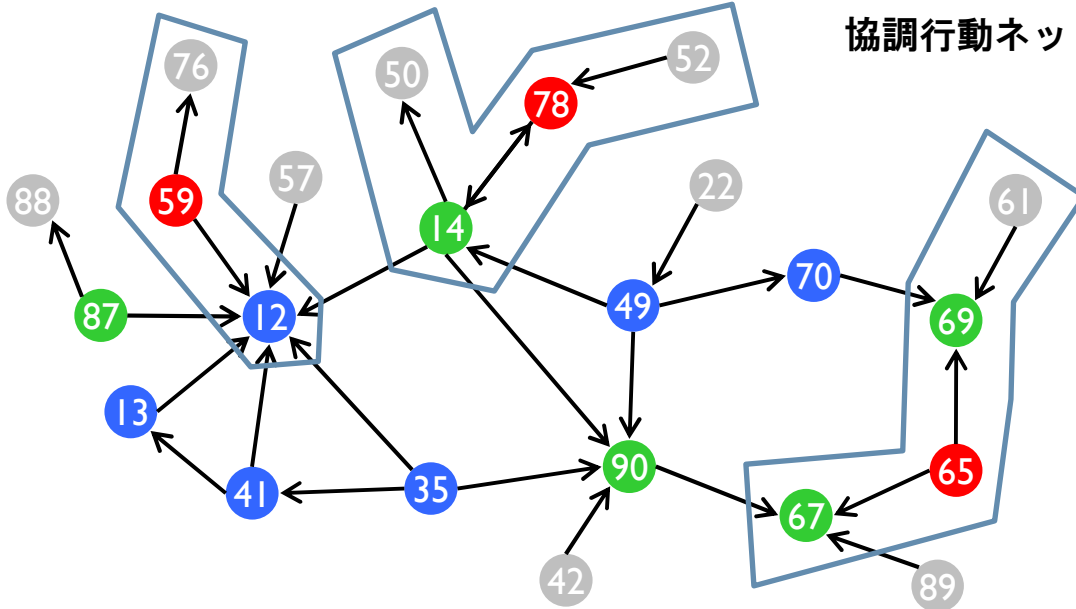
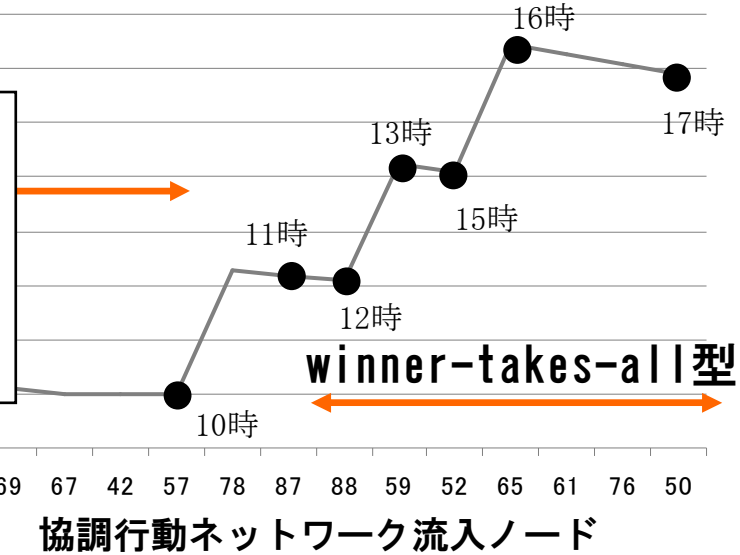
9-11時
協調行動が集中

12-17時
クラスタ分散

協調ネットワーク形成過程

適
0.00008
0.00007

- η 小 — 早期に救助, 避難
- η 中 — 複数リンク, 長く活動
- η 大 — 後半に加入, 周囲と相談



9-11時
協調行動が集中

12-17時
クラスタ分散

● $\eta > 0.012$ ● $0.012 > \eta > 0.006$ ● $0.006 > \eta$ ● 次数1

まとめ・今後の課題

まとめ

- 災害時の行動として，他者との協調行動形成に着目
- **全体を整合**させる個を記述するモデルの導入
- 適応度 η により，ミクロの**情報を縮約**
- **適応度モデルの拡張**により，実データに適用
- 協調行動形成世帯数は**時間帯により不変**

今後の課題

- 時間・空間特性を取り入れたモデルの全体との整合
- 空間ポテンシャルとの違い