

## スケジュール 後半 (予定)

- 8 離散確率論：確率的離散システムの解析 (基礎) (12/8)
- \* 中間レポート出題 (12/15)
- 9 離散確率論：確率的離散システムの解析 (発展) (12/22)
- 10 離散確率論：乱択データ構造とアルゴリズム (基礎) (1/5)
- 11 離散確率論：乱択データ構造とアルゴリズム (発展) (1/12)
- 12 離散確率論：マルコフ連鎖 (基礎) (1/19)
- 13 離散確率論：マルコフ連鎖 (発展) (1/26)
- \* 予備 (2/2)

注意：予定の変更もありうる

## ランダム・グラフ

### 目次

- 1 ランダム・グラフ
- 2 ランダム・グラフの閾値現象
- 3 今日のまとめ

## ランダム・グラフ

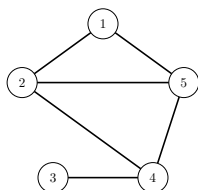
### エルデシュ・レニイのランダム・グラフ：例

グラフの集合上の確率分布として、エルデシュとレニイのランダム・グラフが最も古典的で有名

基本的な考え方：次の2つを予め決めておく

- ▶  $n$ ：頂点数
- ▶  $p$ ：辺確率

$n = 5$ ,  $p = 1/2$  のときの例：このグラフが得られる確率は  $\left(\frac{1}{2}\right)^{10}$



## スケジュール 前半

- 1 数え上げの基礎：二項係数 (10/6)
- 2 数え上げの基礎：漸化式の立て方 (10/13)
- 3 数え上げの基礎：漸化式の解き方 (基礎) (10/20)
- 4 数え上げの基礎：漸化式の解き方 (発展) (10/27)
- \* 休み (祝日) (11/3)
- 5 離散代数：行列式とパーマネント (11/10)
- 6 離散代数：非交差経路の数え上げ (11/17)
- \* 休み (調布祭片付け) (11/24)
- 7 離散代数：全域木の数え上げ (12/1)

## 今日の目標

### 今日の目標

確率的に定義されるグラフの性質を調べられるようになる

- ▶ ランダム・グラフの定義と性質
- ▶ ランダム・グラフの閾値現象 (相転移)

## ランダム・グラフ

### ランダム・グラフ

### ランダム・グラフとは？

「確率的に生成されるグラフ」で、次のいずれかを指す

- ▶ 確率的に生成された1つのグラフ
- ▶ グラフの集合上の確率分布

この講義では、「グラフの集合上の確率分布」を考える

## ランダム・グラフ

### エルデシュ・レニイのランダム・グラフ

グラフの集合上の確率分布として、エルデシュとレニイのランダム・グラフが最も古典的で有名

定義：エルデシュとレニイのランダム・グラフ  $\mathbb{G}(n, p)$

- ▶ 実数  $p \in (0, 1)$  と正整数  $n$  を考える
- ▶  $\mathbb{G}(n, p)$  は、頂点数  $n$  の無向グラフ全体上の確率分布で、次を満たす
  - ▶ 各2頂点組  $\{u, v\}$  に対して、

$$\Pr(\{u, v\} \text{ が辺である}) = p \quad (\text{辺確率})$$

- ▶ 複数の異なる2頂点組  $\{u_1, v_1\}, \dots, \{u_k, v_k\}$  (任意) に対して、辺確率は互いに独立

以後、 $\mathbb{G}(n, p)$  のグラフの頂点集合を  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  で表す

復習：互いに独立であること

「複数の異なる2頂点組  $\{u_1, v_1\}, \dots, \{u_k, v_k\}$  (任意) に対して、辺確率は互いに独立」とは？

任意の  $k \in \mathbb{N}$  と、複数の異なる任意の2頂点組  $\{u_1, v_1\}, \dots, \{u_k, v_k\}$  に対して

$$\begin{aligned} & \Pr(\{u_1, v_1\} \text{ が辺である, かつ, } \dots, \text{ かつ, } \{u_k, v_k\} \text{ が辺である}) \\ &= \Pr(\{u_1, v_1\} \text{ が辺である}) \cdots \Pr(\{u_k, v_k\} \text{ が辺である}) \\ &= p^k \end{aligned}$$

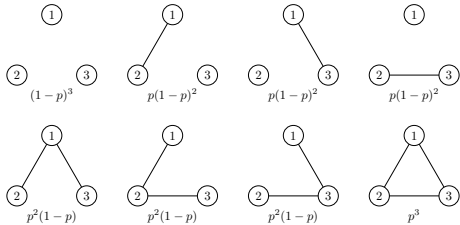
辺確率の独立性から、次がただちに分かる

性質：グラフの生成確率

グラフ  $G$  の頂点数が  $n$ 、辺数が  $m$  のとき、 $\mathbb{G}(n, p)$  において

$$\Pr(G \text{ が生成される}) = p^m (1-p)^{\binom{n}{2}-m}$$

例： $n = 3$  のとき



$G = (V, E)$  を  $\mathbb{G}(n, p)$  に従って得られる無向グラフとする

▶  $v$  以外の任意の頂点  $u \in V - \{v\}$  に対して、

$$\Pr(\{u, v\} \in E) = p$$

▶ 任意の頂点  $u \in V - \{v\}$  に対して、次の標示確率変数  $X_u$  を考える

$$X_u = \begin{cases} 1 & (\{u, v\} \in E), \\ 0 & (\{u, v\} \notin E) \end{cases}$$

▶ このとき、 $\deg(v) = \sum_{u \in V - \{v\}} X_u$

疑問

$\deg(v)$  は  $(n-1)p$  の周辺に集中するのか？

チェルノフ上界の技法を用いる

$$\Pr(\deg(v) \geq 2(n-1)p) = \Pr(2^{\deg(v)} \geq 2^{2(n-1)p}) \leq \frac{E[2^{\deg(v)}]}{2^{2(n-1)p}}$$

ここで、

$$\begin{aligned} E[2^{\deg(v)}] &= E[2^{\sum_{u \in V - \{v\}} X_u}] = E\left[ \prod_{u \in V - \{v\}} 2^{X_u} \right] \\ &= \prod_{u \in V - \{v\}} E[2^{X_u}] = (2p + 1(1-p))^{n-1} = (1+p)^{n-1} \end{aligned}$$

したがって、 $\Pr(\deg(v) \geq 2(n-1)p) \leq \frac{(1+p)^{n-1}}{2^{2(n-1)p}} = \left(\frac{1+p}{4p}\right)^{n-1}$

エルデシュとレニイのランダム・グラフはエルデシュとレニイの論文 (1959) に登場するがそれと同時に、ギルバートの論文 (1959) でも登場している



Paul Erdős (1913-1996)



Alfréd Rényi (1921-1970)



Edgar Gilbert (1923-2013)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erdos\\_budapest\\_fall\\_1992\\_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erdos_budapest_fall_1992_(cropped).jpg)  
<http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/PictDisplay/Renyi.html>  
<https://www.legacy.com/obituaries/dailyrecord/obituary.aspx?m=edgar-nelson-gilbert&pid=165433665&fid=14801>

頂点  $v$  の次数とは、 $v$  に隣接する頂点の数のこと ( $\deg(v)$  で表す)

性質： $\mathbb{G}(n, p)$  の次数の期待値

$\mathbb{G}(n, p)$  では、任意の頂点  $v$  に対して、次が成り立つ

$$E[\deg(v)] = (n-1)p$$

例： $n = 3$  のとき

$$\begin{aligned} E[\deg(\text{頂点 } 1)] &= 0 \cdot (1-p)^3 + 1 \cdot p(1-p)^2 + 1 \cdot p(1-p)^2 + 0 \cdot p(1-p)^2 \\ &\quad + 2 \cdot p^2(1-p) + 1 \cdot p^2(1-p) + 1 \cdot p^2(1-p) + 2 \cdot p^3 \\ &= 2p(1-p)^2 + 4p^2(1-p) + 2p^3 \\ &= 2p \end{aligned}$$

したがって、

$$\begin{aligned} E[\deg(v)] &= E\left[ \sum_{u \in V - \{v\}} X_u \right] \\ &= \sum_{u \in V - \{v\}} E[X_u] \\ &= \sum_{u \in V - \{v\}} \Pr(\{u, v\} \in E) \\ &= (n-1)p \end{aligned}$$

□

① ランダム・グラフ

② ランダム・グラフの閾値現象

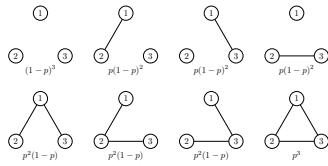
③ 今日のまとめ

無向グラフの**孤立点**：次数が0の頂点のこと

例題

エルデシュとレニイのランダム・グラフ  $G(n, p)$  において、孤立点が存在する確率を計算せよ

$n = 3$  のとき、孤立点が存在する確率  
 $= (1-p)^2(1+2p)$

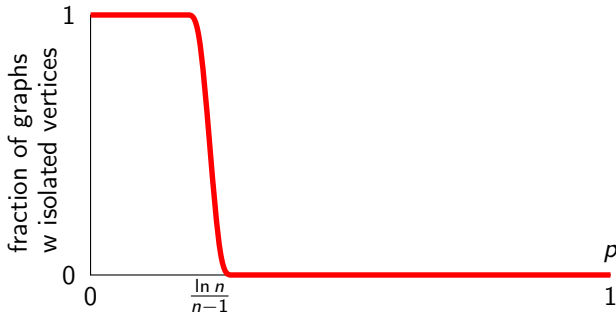


- ▶ これを正確に計算するのは 難しい
- ▶  $\therefore n \rightarrow \infty$  のときの漸近的な振る舞いを考察する

**注**：漸近的な振る舞いの方が (粗い情報なので) 考察しやすい

理論：今から証明すること

$n \rightarrow \infty$  のとき



「孤立点を持つ」という性質は**閾値現象**を持つ (相転移を起こす)

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が大きい場合 (1)

- ▶ 頂点  $v \in V$  に着目
- ▶  $G$  において  $v$  が孤立点である確率を計算すると

$$\Pr(v \text{ が孤立点}) = (1-p)^{n-1}$$

- ▶ 次の確率変数  $X_v$  を考える

$$X_v = \begin{cases} 1 & (v \text{ が孤立点である}), \\ 0 & (v \text{ が孤立点ではない}) \end{cases}$$

- ▶ このとき、 $G$  における孤立点の総数 (確率変数) を  $X$  とすると

$$X = \sum_{v \in V} X_v, \quad \Pr(G \text{ が孤立点を含む}) = \Pr(X \geq 1)$$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が大きい場合 (3)

より一般に、 $p \geq (1+\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}$  とする (ただし、 $\varepsilon > 0$ )

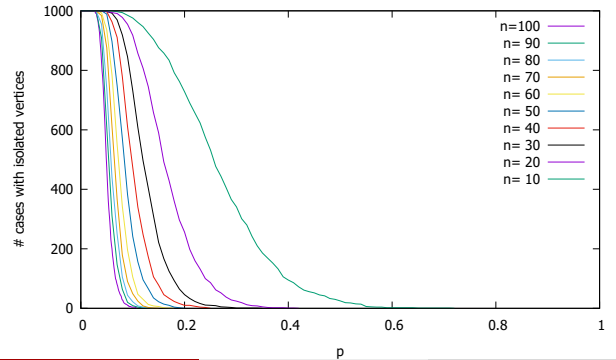
- ▶ このとき、マルコフの不等式より

$$\begin{aligned} \Pr(X \geq 1) &\leq \frac{E[X]}{1} = E[X] = E\left[\sum_{v \in V} X_v\right] = \sum_{v \in V} E[X_v] \\ &= \sum_{v \in V} \Pr(v \text{ は孤立点}) \\ &= \sum_{v \in V} (1-p)^{n-1} = n(1-p)^{n-1} \leq n e^{-p(n-1)} \\ &\leq n e^{-(1+\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1} (n-1)} = n e^{-(1+\varepsilon) \ln n} = n \cdot \frac{1}{n^{1+\varepsilon}} \\ &= \frac{1}{n^\varepsilon} \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

- ▶ つまり、 $\Pr(G \text{ が孤立点を含む}) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$

横軸： $p \in [0.0, 1.0]$

縦軸：1000 回の試行中、孤立点を持つグラフが得られた総数



ランダム・グラフが孤立点を含む確率：先に結論

$G$  は  $G(n, p)$  に従って得られるグラフとする

性質：ランダム・グラフが孤立点を含む確率

$\varepsilon \in (0, 1)$  は任意の正実数

- ▶  $p \leq (1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}$  のとき

$$\Pr(G \text{ が孤立点を含む}) \rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty)$$

- ▶  $p \geq (1+\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}$  のとき

$$\Pr(G \text{ が孤立点を含む}) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$

感覚をつかむため、まず  $\varepsilon = \frac{1}{2}$  のときに証明する

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が大きい場合 (2)

$p \geq \frac{3}{2} \frac{\ln n}{n-1}$  とする

- ▶ このとき、マルコフの不等式より

$$\begin{aligned} \Pr(X \geq 1) &\leq \frac{E[X]}{1} = E[X] = E\left[\sum_{v \in V} X_v\right] = \sum_{v \in V} E[X_v] \\ &= \sum_{v \in V} \Pr(v \text{ は孤立点}) \\ &= \sum_{v \in V} (1-p)^{n-1} = n(1-p)^{n-1} \leq n e^{-p(n-1)} \\ &\leq n e^{-\frac{3}{2} \frac{\ln n}{n-1} (n-1)} = n e^{-\frac{3}{2} \ln n} = n \cdot \frac{1}{n^{3/2}} \\ &= \frac{1}{n^{1/2}} \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

- ▶ つまり、 $\Pr(G \text{ が孤立点を含む}) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (1)

$p \leq (1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}$  とする

- ▶ 先ほどと同様に、 $X_v$  と  $X$  を定義する
- ▶ このとき、 $\Pr(G \text{ が孤立点を含まない}) \rightarrow 0$  を示したいが

$$\begin{aligned} \Pr(G \text{ が孤立点を含まない}) &= \Pr(X = 0) \\ &\leq \Pr(X \geq 0) \\ &= 1 \end{aligned}$$

単純にマルコフの不等式が使えないので、困る…

解決策

チェビシェフの不等式を使う

## 定理：チェビシェフの不等式

確率変数  $X$  と正実数  $t > 0$  に対して、

$$\Pr(|X - E[X]| \geq t) \leq \frac{E[X^2] - E[X]^2}{t^2}$$

証明：マルコフの不等式より

$$\Pr(|X - E[X]| \geq t) = \Pr(|X - E[X]|^2 \geq t^2) \leq \frac{E[|X - E[X]|^2]}{t^2}$$

ここで、

$$\begin{aligned} E[|X - E[X]|^2] &= E[(X - E[X])^2] = E[X^2 - 2E[X]X + E[X]^2] \\ &= E[X^2] - 2E[E[X]X] + E[E[X]^2] \\ &= E[X^2] - 2E[X]E[X] + E[X]^2 \\ &= E[X^2] - 2E[X]^2 + E[X]^2 = E[X^2] - E[X]^2 \quad \square \end{aligned}$$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (3)

$$\begin{aligned} E[X^2] &= E\left[\left(\sum_{v \in V} X_v\right)^2\right] = E\left[\sum_{u \in V} \sum_{v \in V} X_u X_v\right] \\ &= E\left[\sum_{v \in V} X_v^2 + \sum_{u \in V} \sum_{v \in V - \{u\}} X_u X_v\right] \\ &= E\left[\sum_{v \in V} X_v + \sum_{u \in V} \sum_{v \in V - \{u\}} X_u X_v\right] \quad (\because X_v \text{ は } 0 \text{ か } 1) \\ &= E\left[\sum_{v \in V} X_v\right] + E\left[\sum_{u \in V} \sum_{v \in V - \{u\}} X_u X_v\right] \\ &= E[X] + \sum_{u \in V} \sum_{v \in V - \{u\}} E[X_u X_v] \end{aligned}$$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (5)

以上の議論をまとめると、 $p \leq \frac{1}{2} \frac{\ln n}{n-1}$  のとき、

$$\begin{aligned} \Pr(G \text{ が孤立点を含まない}) &\leq \frac{E[X^2]}{E[X]^2} - 1 \\ &= \frac{n(1-p)^{n-1} + n(n-1)(1-p)^{2n-3}}{(n(1-p)^{n-1})^2} - 1 \\ &= \frac{1}{n(1-p)^{n-1}} + \frac{n(n-1)(1-p)^{2n-3}}{n^2(1-p)^{2n-2}} - 1 \\ &\leq \frac{1}{n(1-p)^{n-1}} + \frac{n^2(1-p)^{2n-3}}{n^2(1-p)^{2n-2}} - 1 \\ &= \frac{1}{n(1-p)^{n-1}} + \frac{1}{1-p} - 1 \\ &\leq \frac{1}{n} e^{p(n-1)} + e^p - 1 \end{aligned}$$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (6)

より一般に、 $p \leq (1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}$  のとき (ただし、 $\varepsilon > 0$ )、

$$\begin{aligned} \Pr(G \text{ が孤立点を含まない}) &\leq \frac{1}{n} e^{p(n-1)} + e^p - 1 \\ &\leq \frac{1}{n} e^{(1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1} (n-1)} + e^{(1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}} - 1 \\ &= \frac{1}{n} n^{1-\varepsilon} + e^{(1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}} - 1 \\ &= \frac{1}{n^\varepsilon} + e^{(1-\varepsilon) \frac{\ln n}{n-1}} - 1 \\ &\rightarrow 0 + e^0 - 1 \quad (n \rightarrow \infty) \\ &= 0 \\ \therefore \Pr(G \text{ が孤立点を含む}) &\rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (2)

$$\begin{aligned} \Pr(G \text{ が孤立点を含まない}) &= \Pr(X = 0) \\ &= \Pr(|X - E[X]| = E[X]) \\ &\leq \Pr(|X - E[X]| \geq E[X]) \\ &\leq \frac{E[X^2] - E[X]^2}{E[X]^2} \\ &= \frac{E[X^2]}{E[X]^2} - 1 \end{aligned}$$

## まとめ

- ▶ 既に計算済み： $E[X] = n(1-p)^{n-1}$
- ▶ いまから計算： $E[X^2] = n(1-p)^{n-1} + n(n-1)(1-p)^{2n-3}$

ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (4)

$u$  と  $v$  が異なる頂点であるとき

$$\begin{aligned} E[X_u X_v] &= \Pr(X_u X_v = 1) = \Pr(X_u = 1 \text{ かつ } X_v = 1) \\ &= \Pr(u \text{ と } v \text{ がともに孤立点である}) \\ &= (1-p)^{2n-3} \end{aligned}$$

したがって、

$$\sum_{u \in V} \sum_{v \in V - \{u\}} E[X_u X_v] = n(n-1) \cdot (1-p)^{2n-3}$$

したがって、

$$\begin{aligned} E[X^2] &= E[X] + \sum_{u \in V} \sum_{v \in V - \{u\}} E[X_u X_v] \\ &= n(1-p)^{n-1} + n(n-1)(1-p)^{2n-3} \end{aligned}$$

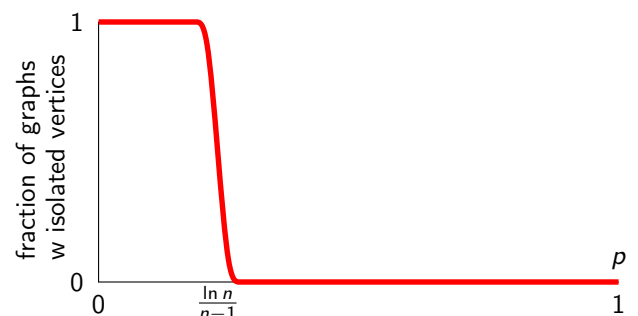
ランダム・グラフが孤立点を含む確率： $p$  が小さい場合 (5) 続き

以上の議論をまとめると、 $p \leq \frac{1}{2} \frac{\ln n}{n-1}$  のとき、

$$\begin{aligned} \Pr(G \text{ が孤立点を含まない}) &\leq \frac{1}{n} e^{p(n-1)} + e^p - 1 \\ &\leq \frac{1}{n} e^{\frac{1}{2} \frac{\ln n}{n-1} (n-1)} + e^{\frac{1}{2} \frac{\ln n}{n-1}} - 1 \\ &= \frac{1}{n} n^{1/2} + e^{\frac{1}{2} \frac{\ln n}{n-1}} - 1 \\ &= \frac{1}{n^{1/2}} + e^{\frac{1}{2} \frac{\ln n}{n-1}} - 1 \\ &\rightarrow 0 + e^0 - 1 \quad (n \rightarrow \infty) \\ &= 0 \\ \therefore \Pr(G \text{ が孤立点を含む}) &\rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

## 理論：まとめ

$n \rightarrow \infty$  のとき



「孤立点を持つ」という性質は閾値現象を持つ (相転移を起こす)

- ① ランダム・グラフ
- ② ランダム・グラフの閾値現象
- ③ 今日のまとめ

## 今日の目標

確率的に定義されるグラフの性質を調べられるようになる

- ▶ ランダム・グラフの定義と性質
- ▶ ランダム・グラフの閾値現象 (相転移)