

# 情報工学の最先端

## —複雑ネットワーク入門—

池口 徹

埼玉大学 工学部 情報システム工学科  
(大学院 理工学研究科 数理電子情報部門 情報領域)

338-8570 さいたま市 桜区 下大久保 255

Tel : 048-858-3577, Fax : 048-858-3716

Email : [tohru@nls.ics.saitama-u.ac.jp](mailto:tohru@nls.ics.saitama-u.ac.jp)

URL : <http://www.nls.ics.saitama-u.ac.jp/~tohru>

# 本日の内容

1. 埼玉大学 工学部 情報システム工学科  
1 年前期 必修「情報システム工学入門」
  - 学科全教員によるオムニバス形式
  - 最新の情報システム工学について

# 本日の内容

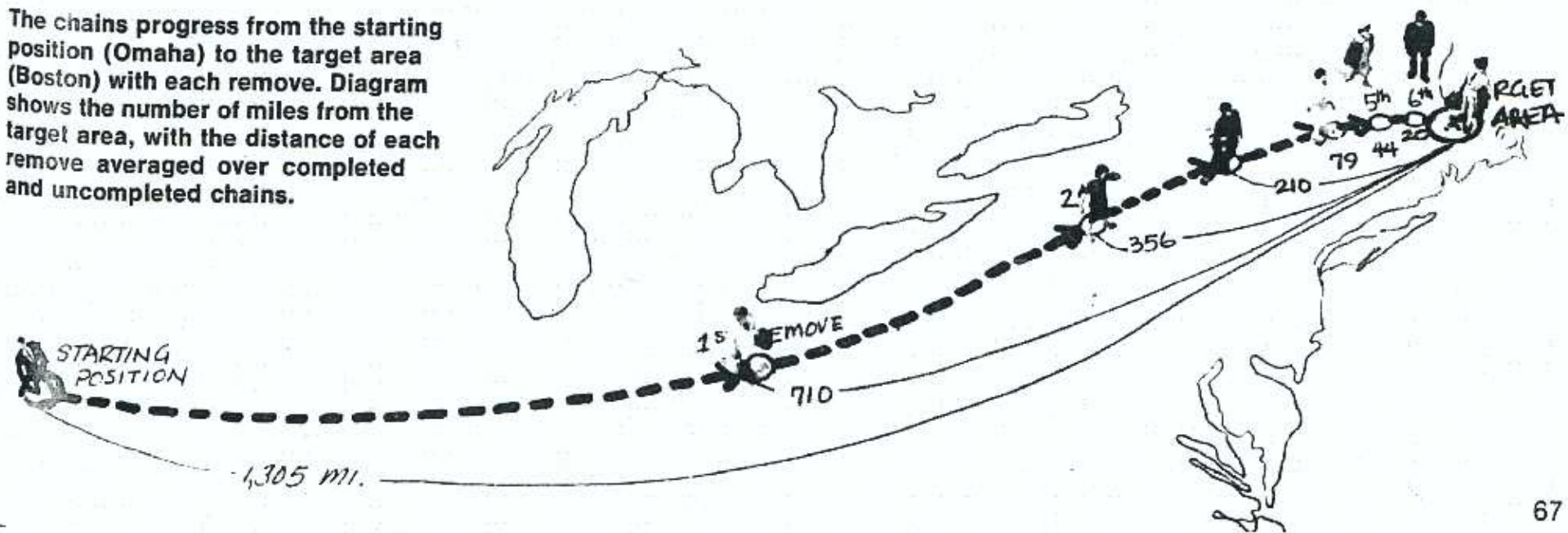
1. 埼玉大学 工学部 情報システム工学科  
1 年前期 必修「情報システム工学入門」
  - 学科全教員によるオムニバス形式
  - 最新の情報システム工学について



2. 今日の題材は
  - (a) H17 年度 池口 担当分  
「複雑ネットワーク入門」
  - (b) 50 分版として短縮
    - 大学の講義 = 90 分一コマ .
    - 少し簡単にしてあります .

# ある実験

The chains progress from the starting position (Omaha) to the target area (Boston) with each remove. Diagram shows the number of miles from the target area, with the distance of each remove averaged over completed and uncompleted chains.



67

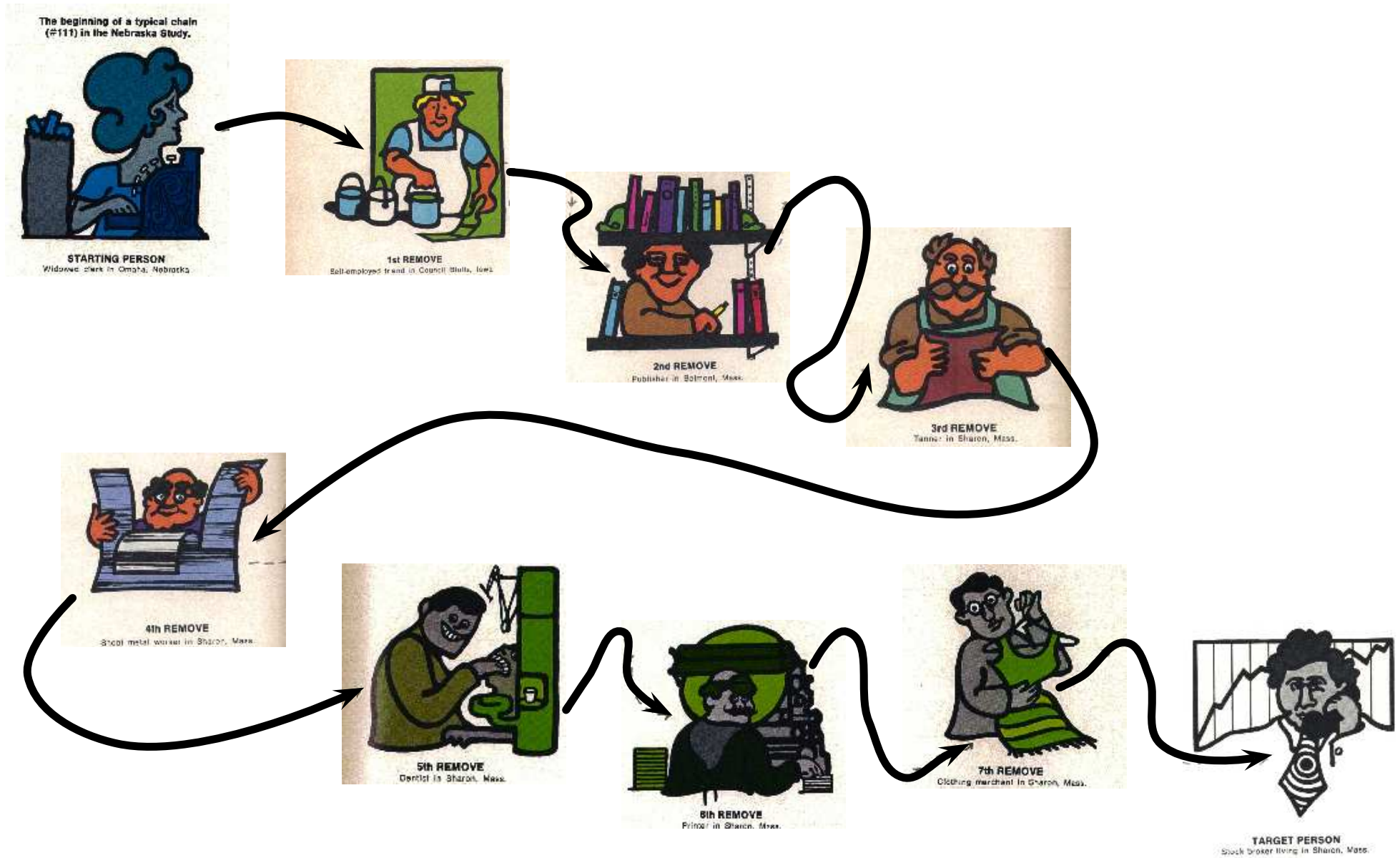
□ Stanley Milgram (アメリカの心理学者)

仮説 世界が知人関係からなるネットワークと考えると，世界はある意味で小さい．⇒ Small World Problem

□ 手紙渡しの実験

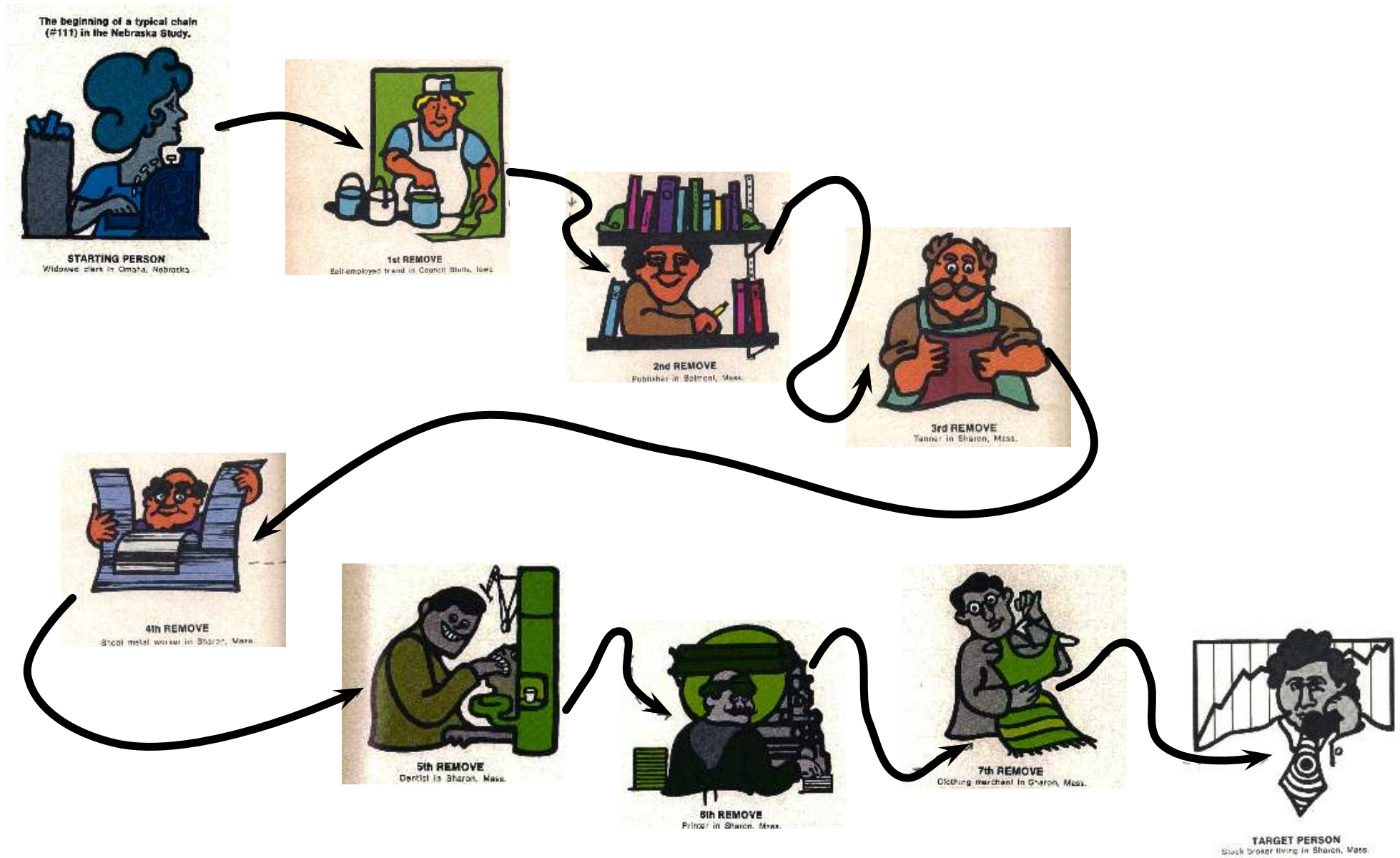
- Wichita (Kansas 州) → Boston (Massachusetts 州)
- Omaha (Nebraska 州) → Boston (Massachusetts 州)

# 手紙渡しの実験





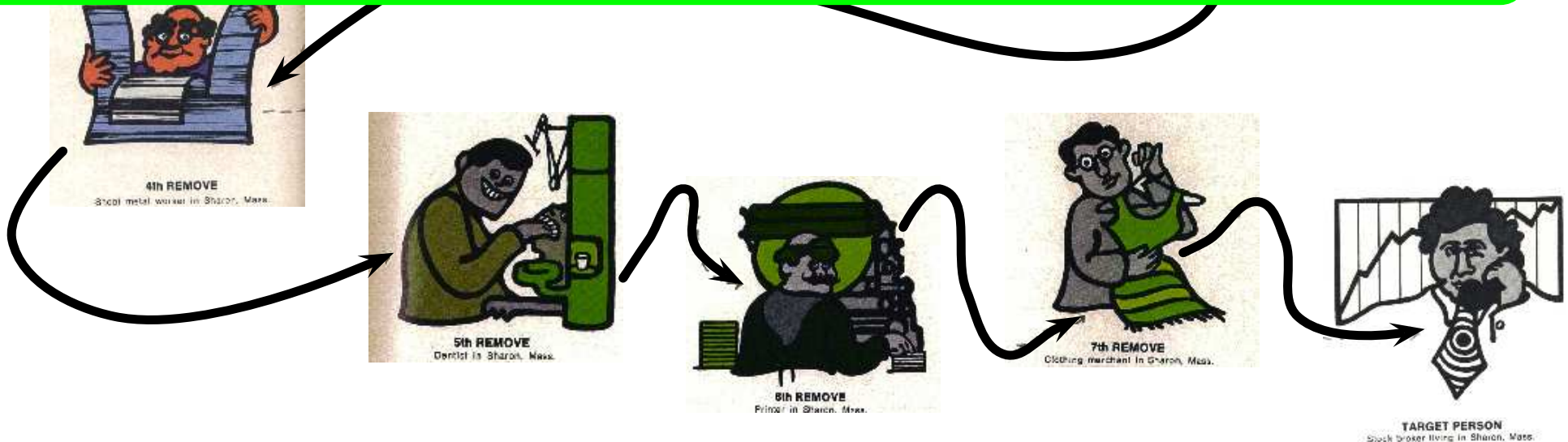
# 手紙渡しの実験



# 手紙渡しの実験

The beginning of a typical chain (#111) in the Nebraska Study.

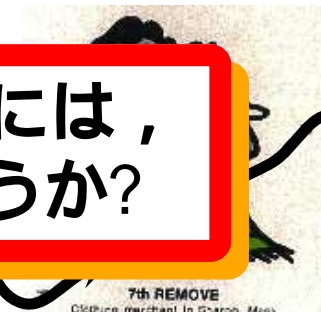
- ❑ 目標人物の名前を知っていたら，直接送付してよい．
  - ❑ 目標人物を知らない場合は，直接連絡をとらずに，目標人物を自分よりよく知っていそうな人に送付する．
- 注 「知っている」 = 「ファーストネームで呼び合う程度」



# 手紙渡しの実験

The beginning of a typical chain (#111) in the Nebraska Study.

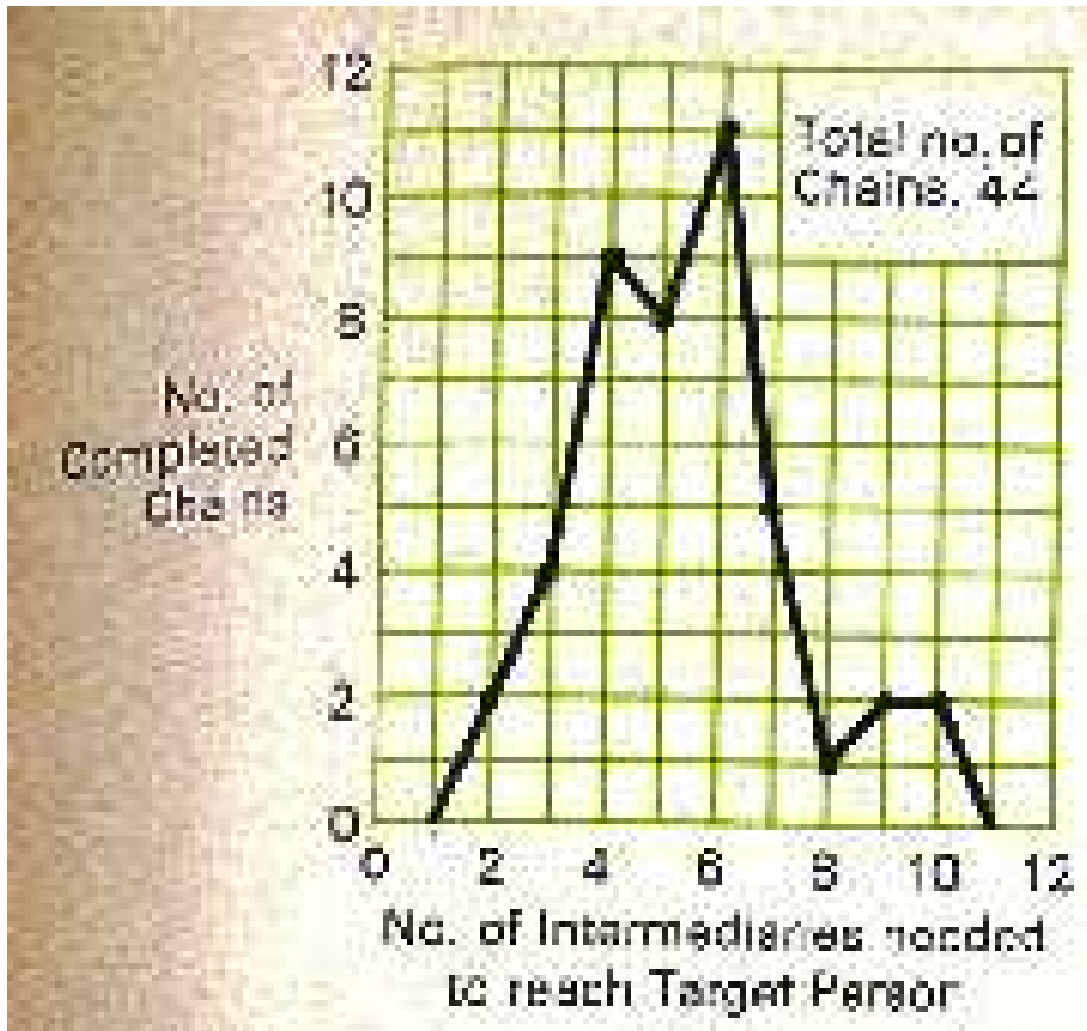
- ❑ 目標人物の名前を知っていたら，直接送付してよい．
  - ❑ 目標人物を知らない場合は，直接連絡をとらずに，目標人物を自分よりよく知っていそうな人に送付する．
- 注 「知っている」 = 「ファーストネームで呼び合う程度」



手紙が宛先に届けられるには，  
平均何人必要だっただろうか？

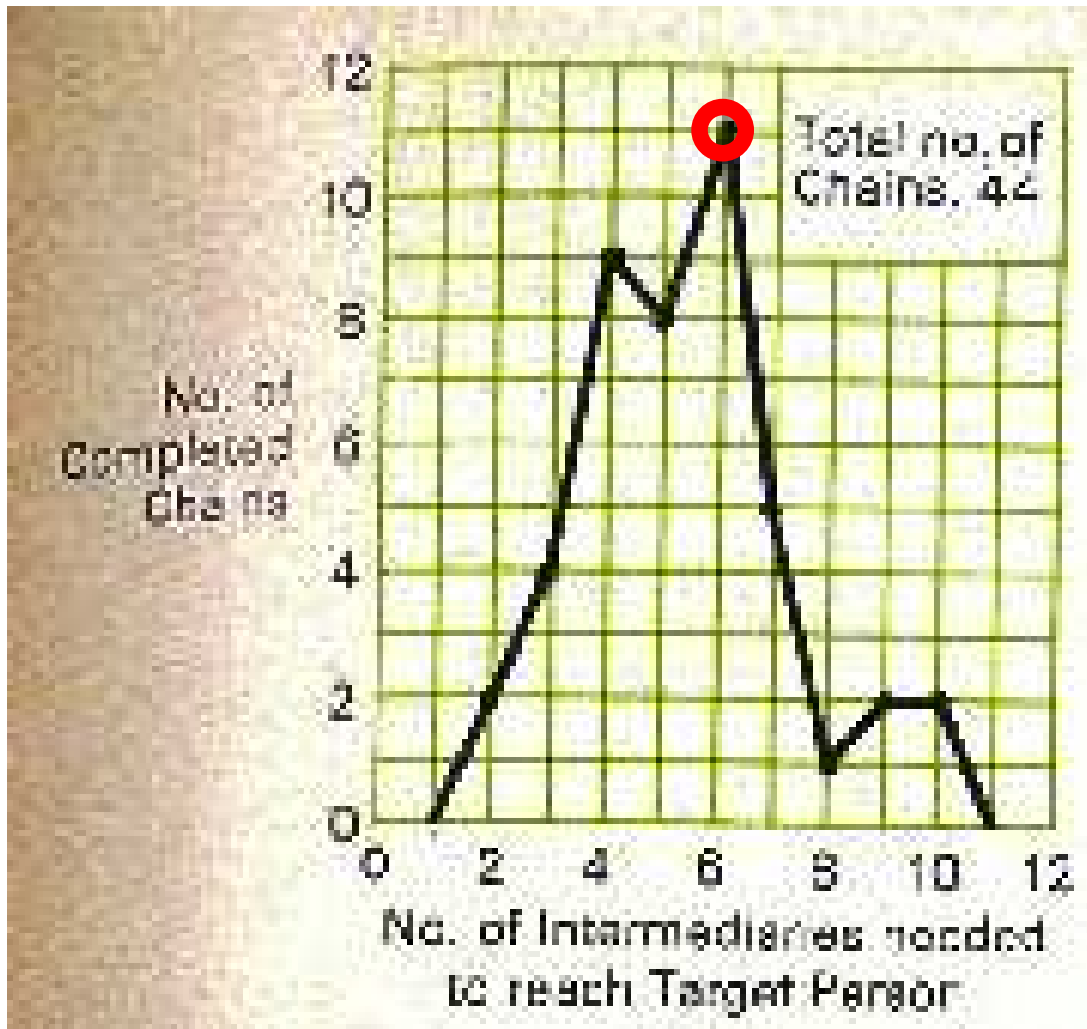


# 驚くべき結果



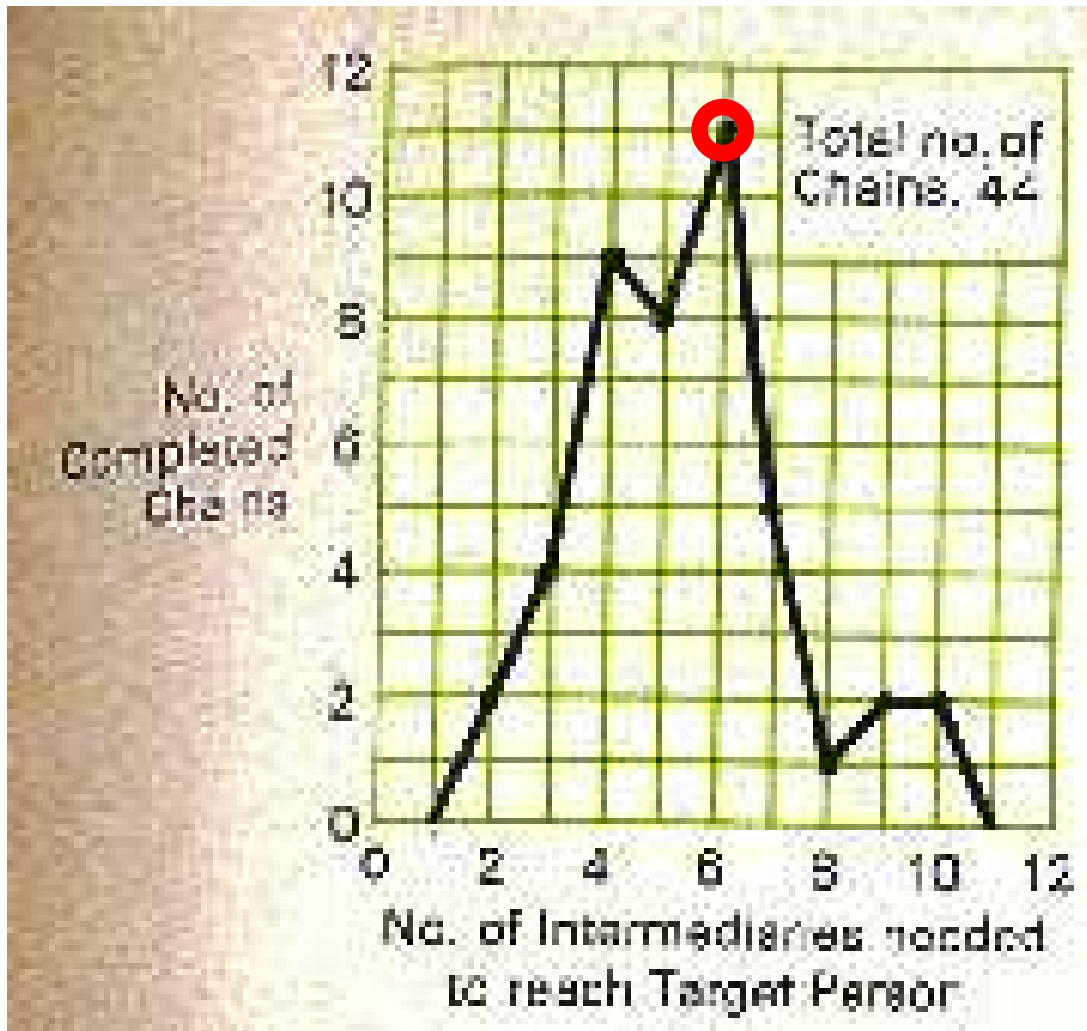
S. Milgram: "The Small-World Problem," *Psychology Today*, Vol.1, pp.67–67, 1967.

# 驚くべき結果



S. Milgram: "The Small-World Problem," Psychology Today, Vol.1, pp.67-67, 1967.

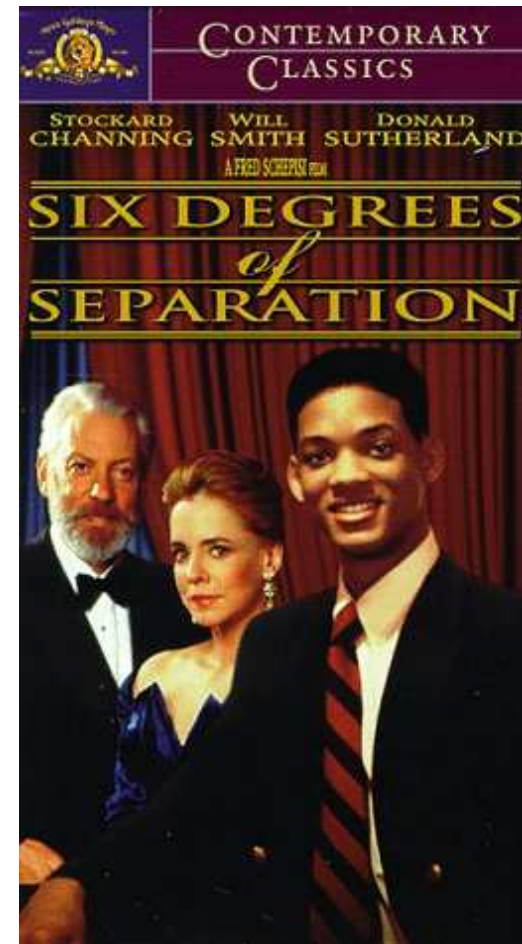
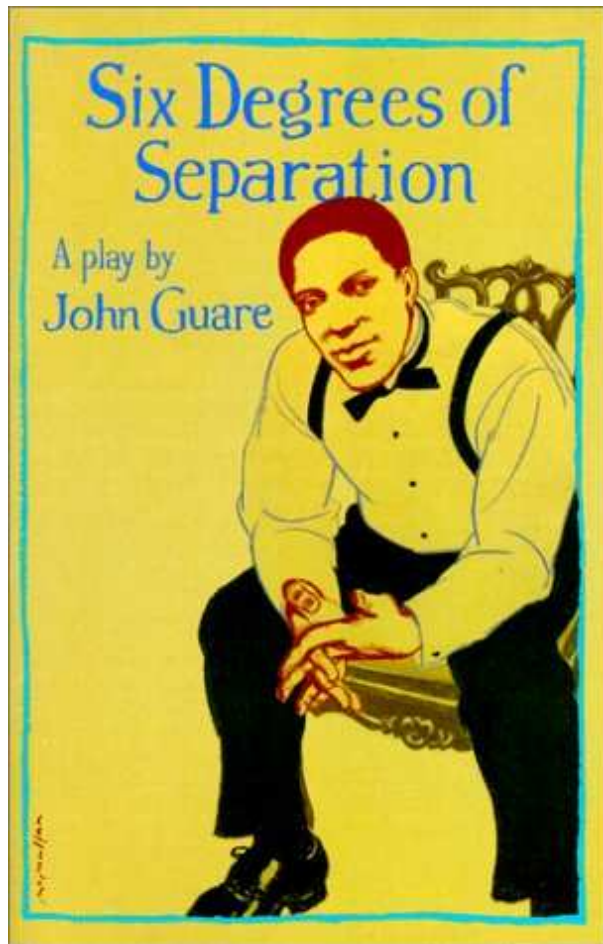
# 驚くべき結果



6 次の隔たり  
Six Degrees of Separation

S. Milgram: "The Small-World Problem," *Psychology Today*, Vol.1, pp.67–67, 1967.

# Six Degrees of Separation



邦題 『私に近い6人の他人』

# ケビン・ベーコン・ゲーム



## □ 俳優の共演関係

- ケビン・ベーコン自身のベーコン数は
- ケビン・ベーコンと共演した俳優のベーコン数は
- ケビン・ベーコンと共演した俳優と共演した俳優のベーコン数は

□ <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>

## □ 例: ハリソン・フォード

The [Oracle](#) says: [Harrison Ford](#) has a Bacon number of [2](#). [Harrison Ford](#) was in [Clear and Present Danger \(1994\)](#) with [John Lafayette](#). [John Lafayette](#) was in [Loverboy \(2005\)](#) with [Kevin Bacon](#).



# ケビン・ベーコン・ゲーム



- 俳優の共演関係
  - ケビン・ベーコン自身のベーコン数は 0
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優のベーコン数は
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優と共演した俳優のベーコン数は
- <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>
- 例: ハリソン・フォード  
The Oracle says: Harrison Ford has a Bacon number of . Harrison Ford was in Clear and Present Danger (1994) with John Lafayette. John Lafayette was in Loverboy (2005) with Kevin Bacon.

# ケビン・ベーコン・ゲーム



- 俳優の共演関係
  - ケビン・ベーコン自身のベーコン数は 0
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優のベーコン数は 1
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優と共演した俳優のベーコン数は
- <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>
- 例: ハリソン・フォード  
The Oracle says: Harrison Ford has a Bacon number of . Harrison Ford was in Clear and Present Danger (1994) with John Lafayette. John Lafayette was in Loverboy (2005) with Kevin Bacon.

# ケビン・ベーコン・ゲーム



- 俳優の共演関係
  - ケビン・ベーコン自身のベーコン数は 0
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優のベーコン数は 1
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優と共演した俳優のベーコン数は 2
- <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>
- 例: ハリソン・フォード  
The Oracle says: Harrison Ford has a Bacon number of . Harrison Ford was in Clear and Present Danger (1994) with John Lafayette. John Lafayette was in Loverboy (2005) with Kevin Bacon.

# ケビン・ベーコン・ゲーム



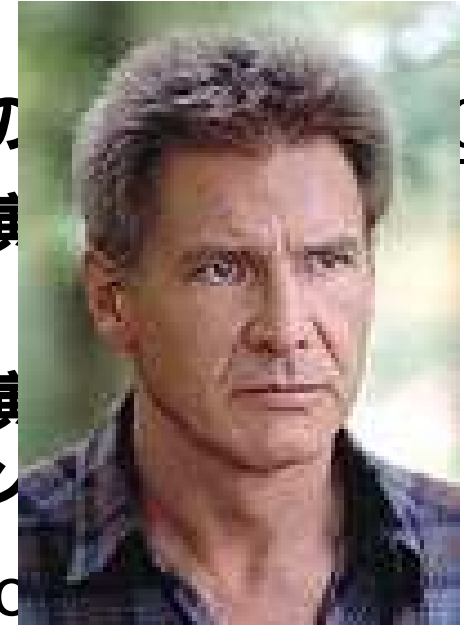
- 俳優の共演関係
  - ケビン・ベーコン自身のベーコン数は 0
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優のベーコン数は 1
  - ケビン・ベーコンと共演した俳優と共演した俳優のベーコン数は 2
- <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>
- 例: ハリソン・フォード  
The **Oracle** says: **Harrison Ford** has a Bacon number of 2 . **Harrison Ford** was in **Clear and Present Danger (1994)** with **John Lafayette**. **John Lafayette** was in **Loverboy (2005)** with **Kevin Bacon**.

# ケビン・ベーコン・ゲーム



## □ 俳優の共演関係

- ケビン・ベーコン自身の
- ケビン・ベーコンと共演  
ベーコン数は 1
- ケビン・ベーコンと共演  
共演した俳優は 1 人である



□ <http://www.cba.edu/cba>

## □ 例: ハリソン・フォード

The **C** actor **Harrison Ford** has a Bacon number of **2**. Harrison Ford was in **Clear and Present Danger** (1994) with **John Lafayette**. **John Lafayette** was in **Loverboy** (2005) with **Kevin Bacon**.





# ケビン・ベーコン数の分布

ベーコン数	俳優数	累積数
0	1	1
1	1,975	1,976
2	172,390	174,366
3	488,225	662,591
4	117,091	779,682
5	8,192	787,874
6	776	788,650
7	79	788,729
8	3	788,732
平均 2.949	計 788,732 人	

(<http://www.cs.virginia.edu/oracle/> より 2006年7月11日調査)

# ケビン・ベーコン数の分布

ベーコン数	俳優数	累積数
0	1	1
1	1,975	1,976
2	172,390	174,366
3	488,225	662,591
4	117,091	779,682
5	8,102	787,874
6	776	788,650
7	79	788,729
8	3	788,732
平均 2.949	計 788,732 人	

(<http://www.cs.virginia.edu/oracle/> より 2006年7月11日調査)

# 我々はネットワークの中に生きている

- ❑ 対人関係・友人関係
- ❑ 俳優の共演関係
- ❑ インターネット [コンピュータが物理的に接続]
- ❑ World Wide Web [ハイパーリンク]
- ❑ 会社間の取引関係
- ❑ 遺伝子ネットワーク
- ❑ 伝染病 (ペスト, エボラ出血熱, SARS)
- ❑ ウイルス (生物/コンピュータ)
- ❑ 脳・神経回路網
- ❑ 飛行機・道路・鉄道
- ❑ 電力輸送配電網
- ❑ 噂・口コミ

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに **短絡的** のか?
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という
    - ネットワークの **短絡性** ということが大事
  - WWW の場合、平均 **2.949** (クリック) と言われている
    - **短絡性** もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK
    - ✌ **短絡性** 数
    - ✌ **短絡性** 数
    - ✌ **短絡性** 数
    - ✌ **短絡性** 数
    - ✌ **短絡性** 数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに 狭い のか?
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という
    - ネットワークの  $\langle k \rangle$  ということが大事
  - WWW の場合、平均  $\langle k \rangle$  (クリック) と言われている
    - もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK



数



数



数



数



数



# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない
    - ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 (クリック) と言われている
    - もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK



数



数



数



数



数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない
    - ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
    - もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK



数



数



数



数



数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない  
→ ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
  - 誰が中心か もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK



数



数



数



数



数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
    - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
    - ベーコン数の平均値 2.949
  - 注意
    - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない  
→ ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
    - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
    - 誰が中心か もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
    - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK
- ✌ マリリン・モンロー 数
- ✌ 数
- ✌ 数
- ✌ 数
- ✌ 数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに 狭い のか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない
    - ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
  - 誰が中心か もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK
    - ✌ マリリン・モンロー 数
    - ✌ アンジェリーナ・ジョリー 数
    - ✌ 数
    - ✌ 数
    - ✌ 数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない  
→ ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
  - 誰が中心か もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK
    - ✌ マリリン・モンロー 数
    - ✌ アンジェリーナ・ジョリー 数
    - ✌ 米倉涼子 数
    - ✌ 数
    - ✌ 数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない  
→ ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
  - 誰が中心か もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK
    - ✌ マリリン・モンロー 数
    - ✌ アンジェリーナ・ジョリー 数
    - ✌ 米倉涼子 数
    - ✌ 沢尻エリカ 数
    - ✌ 数



# 問題意識

□ 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに 狭い のか？

- 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
- ベーコン数の平均値 2.949

□ 注意

- 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない  
→ ネットワークの サイズに比べて
- WWW の場合、平均 19 (クリック)
- 誰が中心か もあまり意味はない(ク)
- 他の俳優・女優を中心にした数でも



マリリン・モンロー 数



アンジェリーナ・ジョリー 数



米倉涼子 数



沢尻エリカ 数



数



# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに狭いのか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない  
→ ネットワークの サイズに比べて小さい ということが大事
  - WWW の場合、平均 19 (クリック) と言われている
  - 誰が中心か もあまり意味はない (ケビン・ベーコンでなくても良い)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも OK
    - ✌ マリリン・モンロー 数
    - ✌ アンジェリーナ・ジョリー 数
    - ✌ 米倉涼子 数
    - ✌ 沢尻エリカ 数
    - ✌ 相武紗季 数

# 問題意識

- 現実世界のネットワークは、なぜ、これほどまでに 狭い のか？
  - 6 次の隔たり (手紙渡しの実験)
  - ベーコン数の平均値 2.949
- 注意
  - 6 や 2.949 という 数字自体に意味はない
    - ネットワークの サイズに比べて
  - WWW の場合、平均 19 (クリック)
  - 誰が中心か もあまり意味はない (ク)
  - 他の俳優・女優を中心にした数でも
    - ✌ マリリン・モンロー 数
    - ✌ アンジェリーナ・ジョリー 数
    - ✌ 米倉涼子 数
    - ✌ 沢尻エリカ 数
    - ✌ 相武紗季 数



# 問題意識

- 現実世界のネットワークには
  - があるのだろうか？
  - もしあるとしたら、 だろうか？
  - それは されるのだろうか？
  - このようなことを考えると できるのか？



これを調べるための方法の一つ



# 問題意識

- 現実世界のネットワークには
  - 構造的な特徴 があるのだろうか？
  - もしあるとしたら、 だろうか？
  - それは されるのだろうか？
  - このようなことを考えると できるのか？



これを調べるための方法の一つ



# 問題意識

- 現実世界のネットワークには
  - 構造的な特徴 があるのだろうか？
  - もしあるとしたら、どのような特徴 だろうか？
  - それは されるのだろうか？
  - このようなことを考えると できるのか？



これを調べるための方法の一つ



# 問題意識

- 現実世界のネットワークには
  - 構造的な特徴 があるのだろうか？
  - もしあるとしたら、どのような特徴 だろうか？
  - それは どのように形成 されるのだろうか？
  - このようなことを考えると できるのか？



これを調べるための方法の一つ





# 問題意識

- 現実世界のネットワークには
  - 構造的な特徴 があるのだろうか？
  - もしあるとしたら、どのような特徴 だろうか？
  - それは どのように形成 されるのだろうか？
  - このようなことを考えると 何が解決 できるのか？



これを調べるための方法の一つ



# 問題意識

- 現実世界のネットワークには
  - 構造的な特徴 があるのだろうか？
  - もしあるとしたら、どのような特徴 だろうか？
  - それは どのように形成 されるのだろうか？
  - このようなことを考えると 何が解決 できるのか？



これを調べるための方法の一つ

**グラフ理論 (graph theory)**

# グラフ理論

## □ 純粋数学の一分野 (1736 年以降)

- Euler, Cauchy, Hamilton, Cayley, Kirchhoff ...
- Erdős, Rényi (random network, 1950's)

## □ 応用への広がり (1998 年以降)

- Watts, Strogatz (small world network, 1998)
- Barabási and colleagues (scale free network, 1999)

## □ グラフ (= ネットワーク) とは？

- 繋がりを と で表現 .  
例えば , 人を すると , 友人関係は で表される .
- 人と友人関係に限らず , いろいろなネットワークにおける  
繋がりを したもの

# グラフ理論

## □ 純粋数学の一分野 (1736 年以降)

- Euler, Cauchy, Hamilton, Cayley, Kirchhoff ...
- Erdős, Rényi (random network, 1950's)

## □ 応用への広がり (1998 年以降)

- Watts, Strogatz (small world network, 1998)
- Barabási and colleagues (scale free network, 1999)

## □ グラフ (= ネットワーク) とは？

- 繋がりを 点 (ノード, node) と 辺 (エッジ, edge) で表現 .  
例えば, 人を ノード すると, 友人関係は 辺 で表される .
- 人と友人関係に限らず, いろいろなネットワークにおける 繋がりを モデル したもの

# グラフ理論

## □ 純粋数学の一分野 (1736 年以降)

- Euler, Cauchy, Hamilton, Cayley, Kirchhoff ...
- Erdős, Rényi (random network, 1950's)

## □ 応用への広がり (1998 年以降)

- Watts, Strogatz (small world network, 1998)
- Barabási and colleagues (scale free network, 1999)

## □ グラフ (= ネットワーク) とは？

- 繋がりを 点 (ノード, node) と 線 (リンク, link) で表現 .  
例えば, 人を すると, 友人関係は で表される .
- 人と友人関係に限らず, いろいろなネットワークにおける  
繋がりを したものの

# グラフ理論

## □ 純粋数学の一分野 (1736 年以降)

- Euler, Cauchy, Hamilton, Cayley, Kirchhoff ...
- Erdős, Rényi (random network, 1950's)

## □ 応用への広がり (1998 年以降)

- Watts, Strogatz (small world network, 1998)
- Barabási and colleagues (scale free network, 1999)

## □ グラフ (= ネットワーク) とは？

- 繋がりを 点 (ノード, node) と 線 (リンク, link) で表現 .  
例えば, 人を 点 すると, 友人関係は 線 で表される .
- 人と友人関係に限らず, いろいろなネットワークにおける  
繋がりを したもの

# グラフ理論

## □ 純粋数学の一分野 (1736 年以降)

- Euler, Cauchy, Hamilton, Cayley, Kirchhoff ...
- Erdős, Rényi (random network, 1950's)

## □ 応用への広がり (1998 年以降)

- Watts, Strogatz (small world network, 1998)
- Barabási and colleagues (scale free network, 1999)

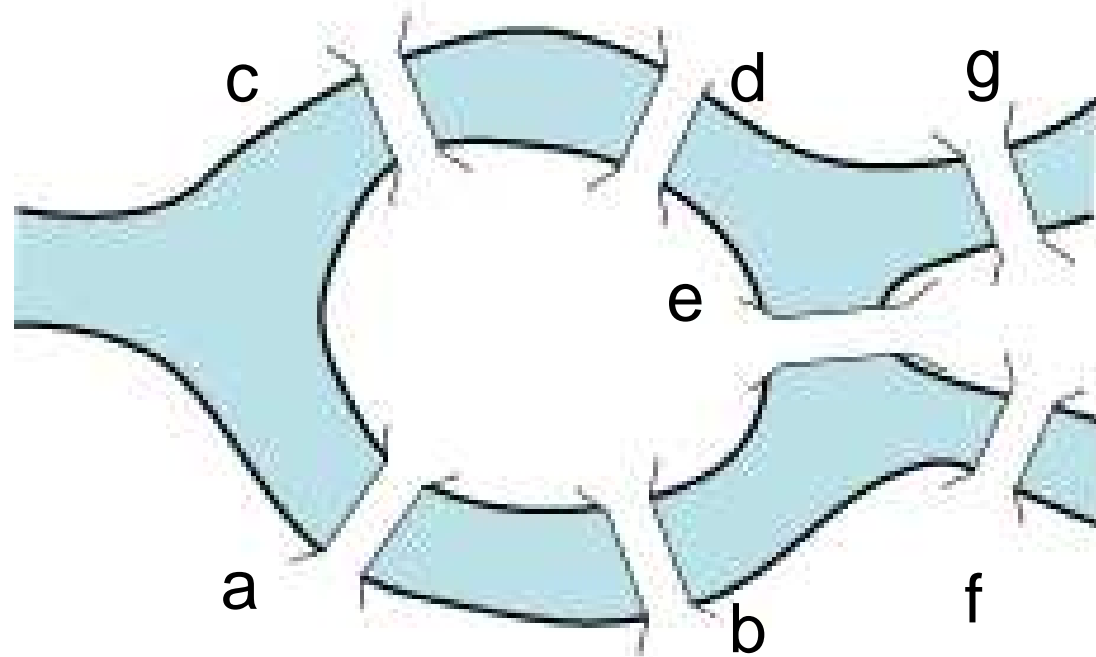
## □ グラフ (= ネットワーク) とは？

- 繋がりを 点 (ノード, node) と 線 (リンク, link) で表現 .  
例えば, 人を 点 すると, 友人関係は 線 で表される .
- 人と友人関係に限らず, いろいろなネットワークにおける繋がりを 抽象化 したもの



# グラフ理論のはじまり (1736)

ケーニヒスベルグ (プロイセン) の橋 (1875 年以前)



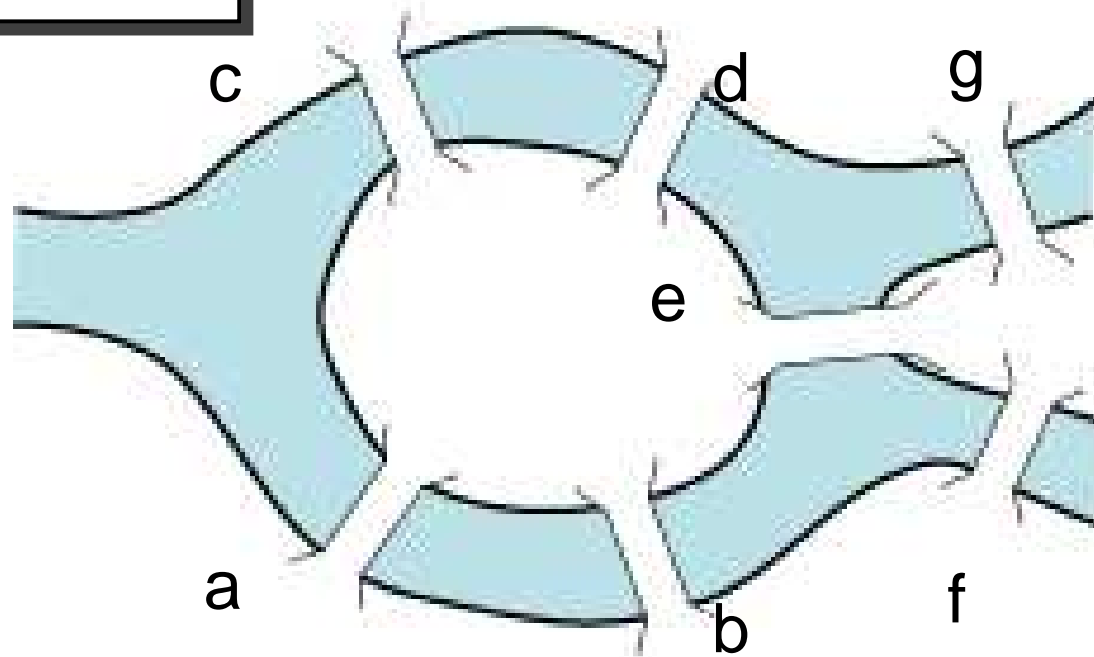
どの橋も二度渡ることなく、全ての橋を渡ることにはできるか？

⇒ 一筆書きできるか、ということ。

# Eulerの証明 (1736)

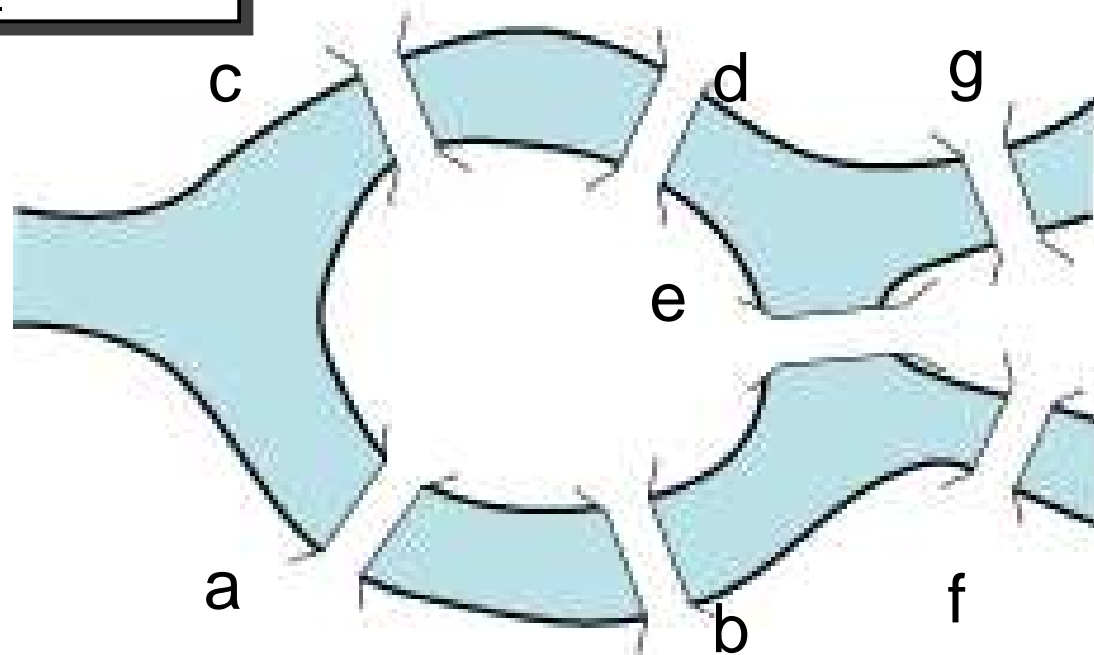
□ 中州, 島 ⇒

□ 橋 ⇒



# Eulerの証明 (1736)

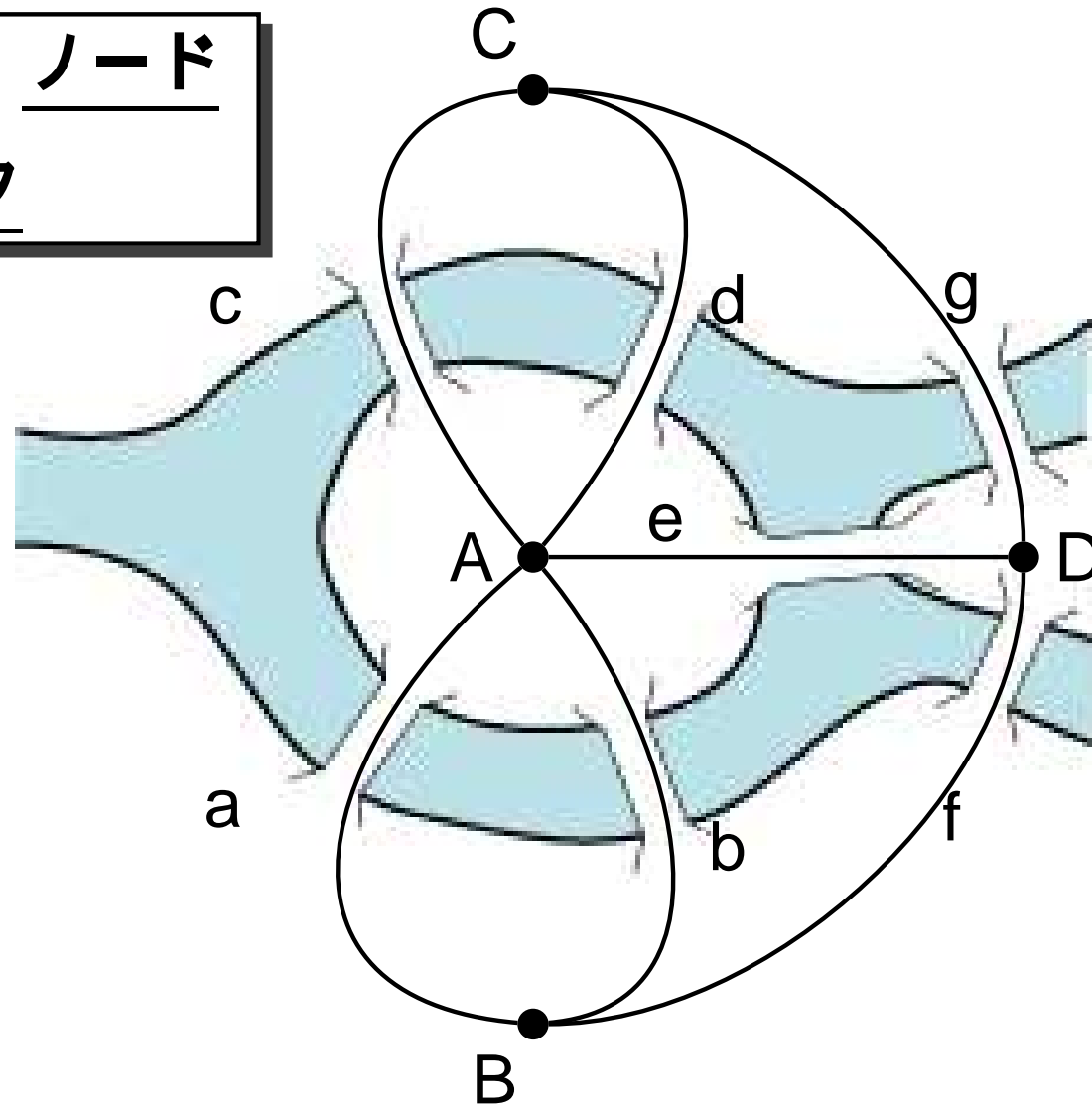
- 中州, 島 ⇒ ノード
- 橋 ⇒ リンク



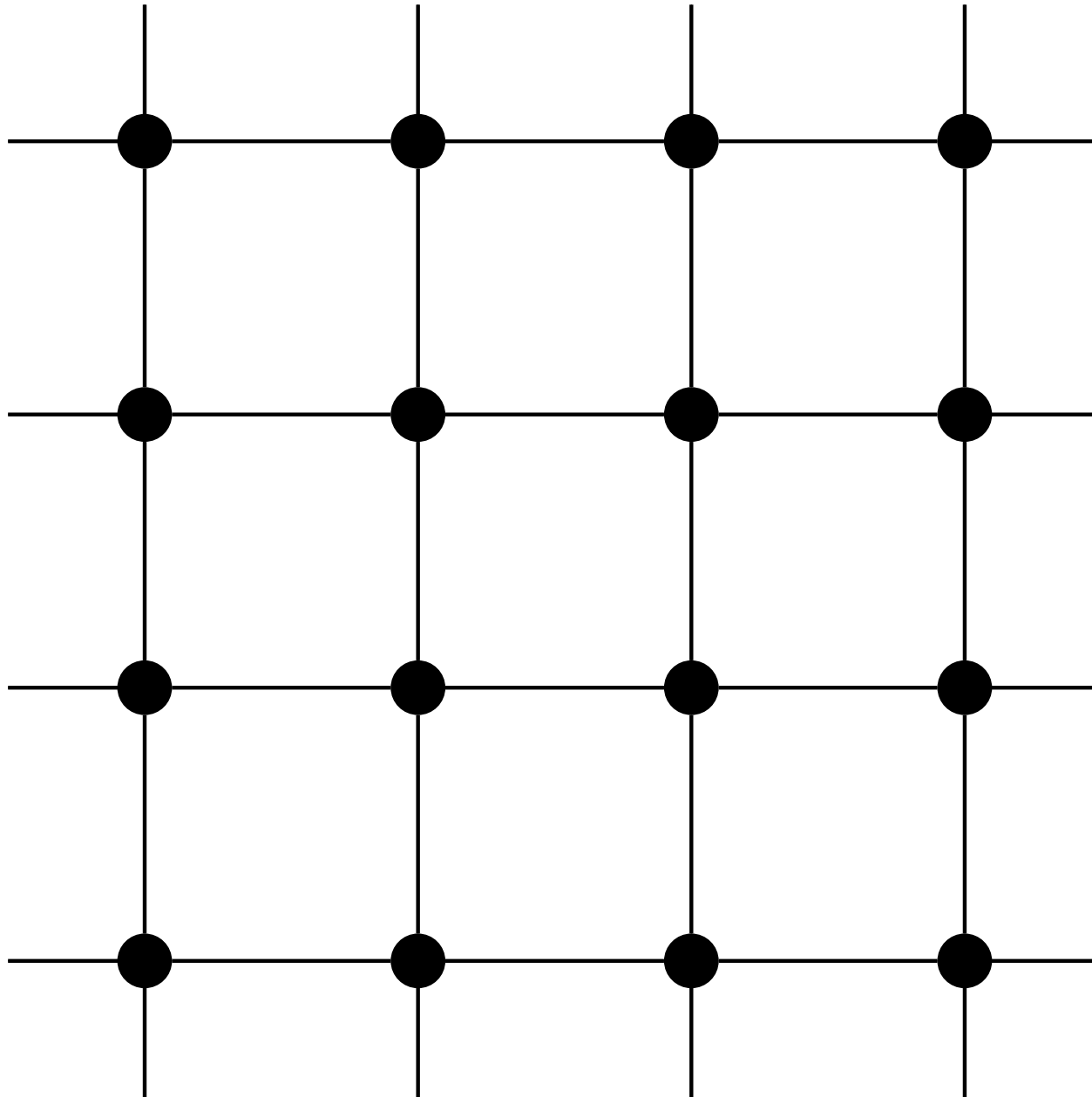
# Eulerの証明 (1736)

□ 中州, 島 ⇒ ノード

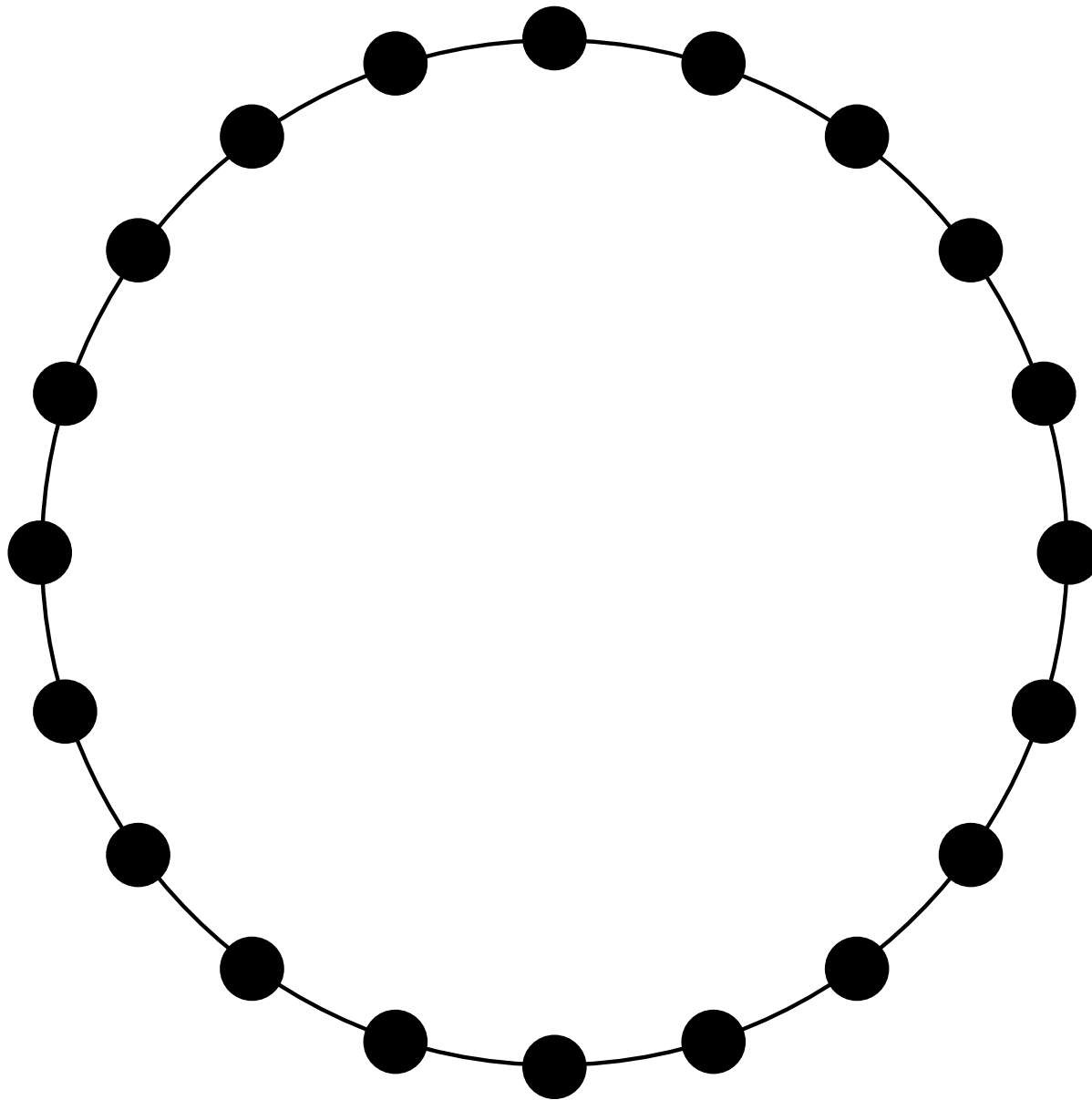
□ 橋 ⇒ リンク



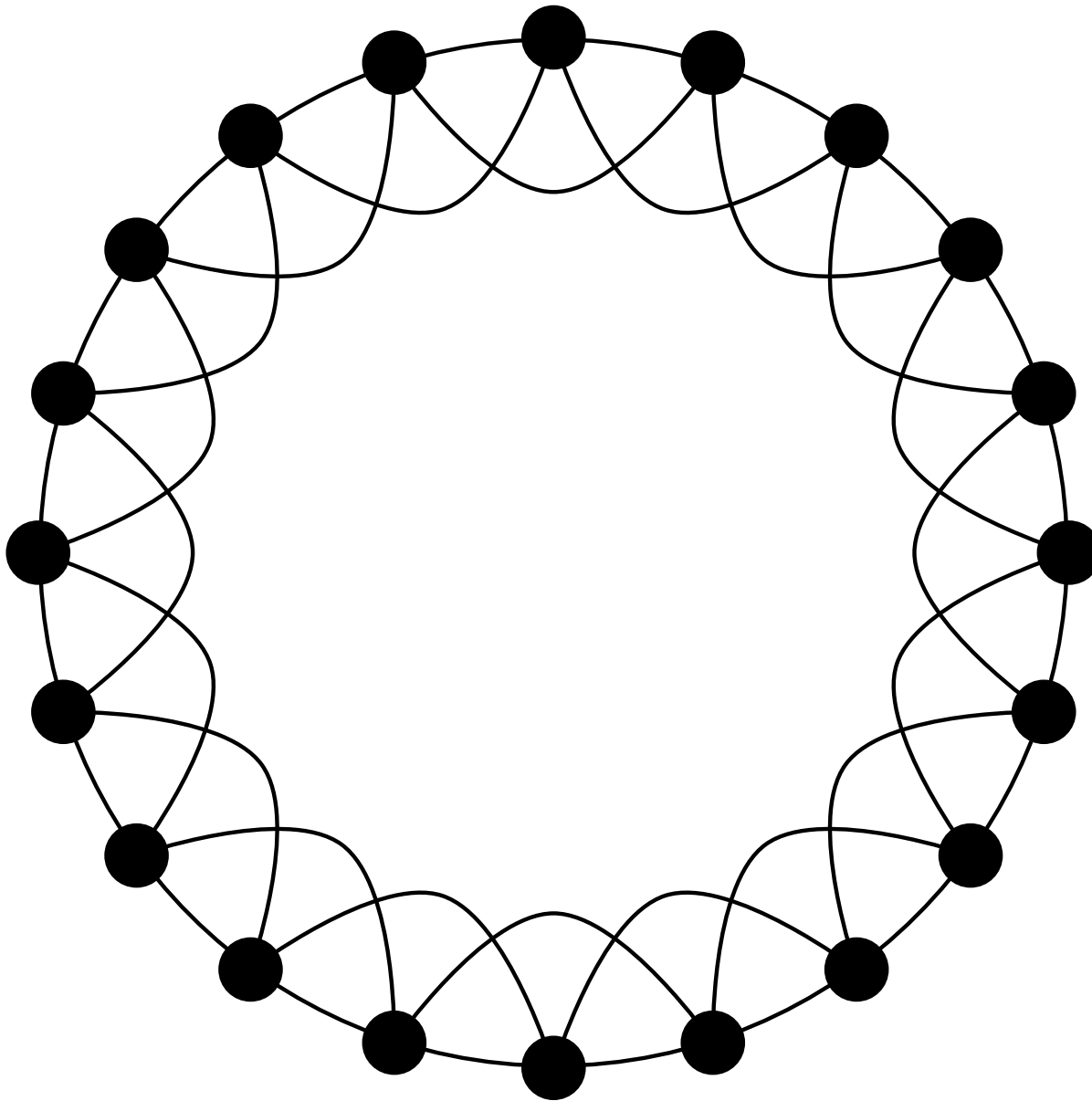
# 規則的 (20世紀半ばまで)



# 規則的 (20世紀半ばまで)

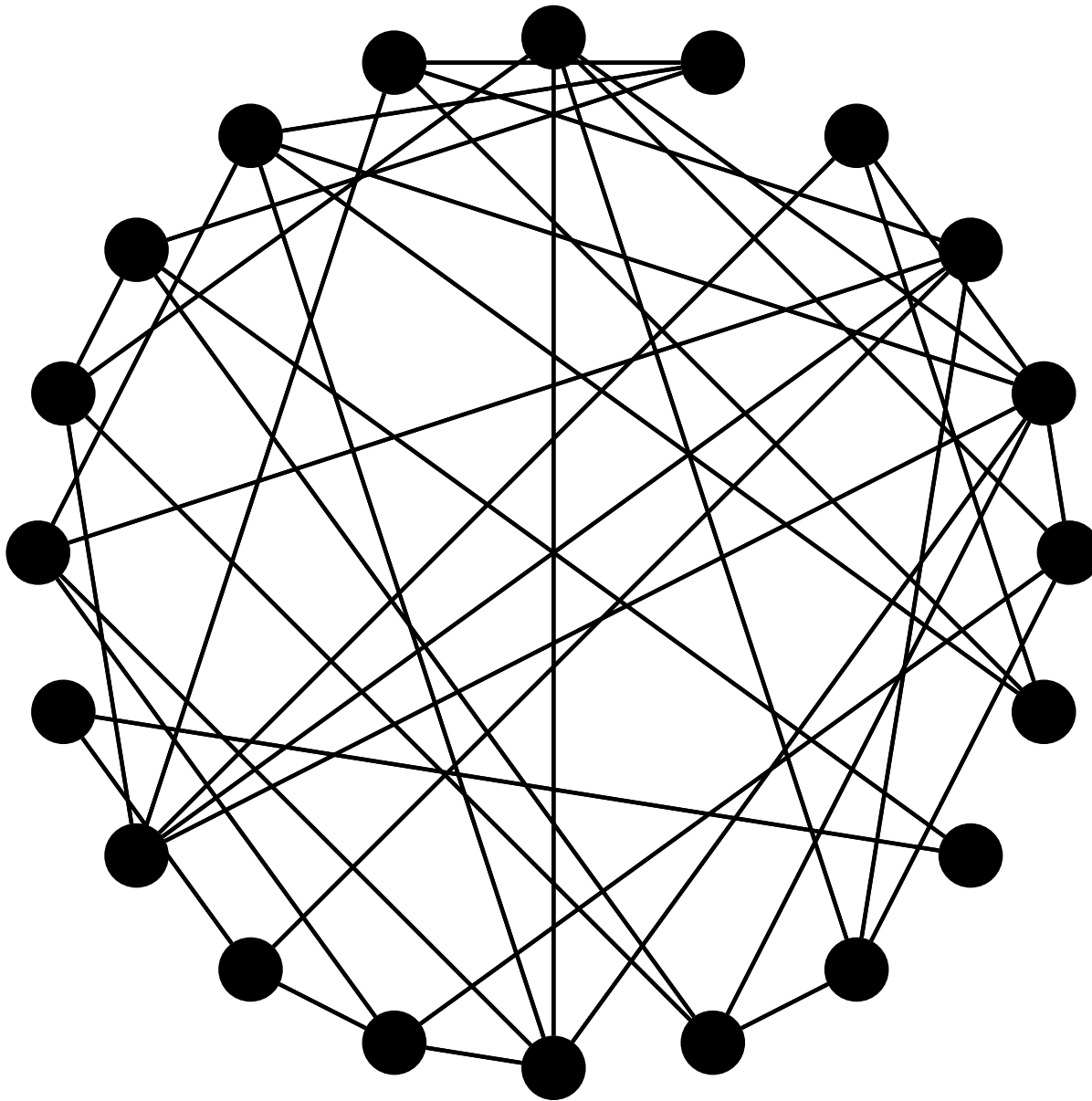


# 規則的



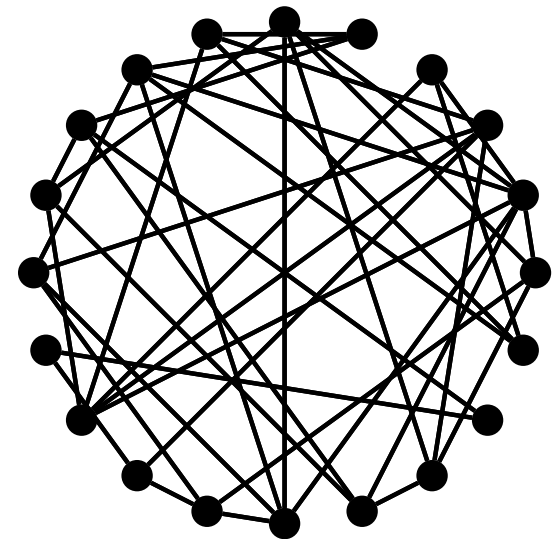
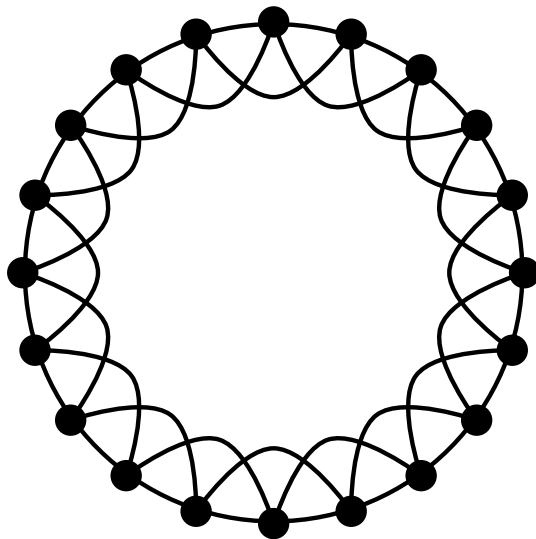


# ランダム (20世紀半ば以降)



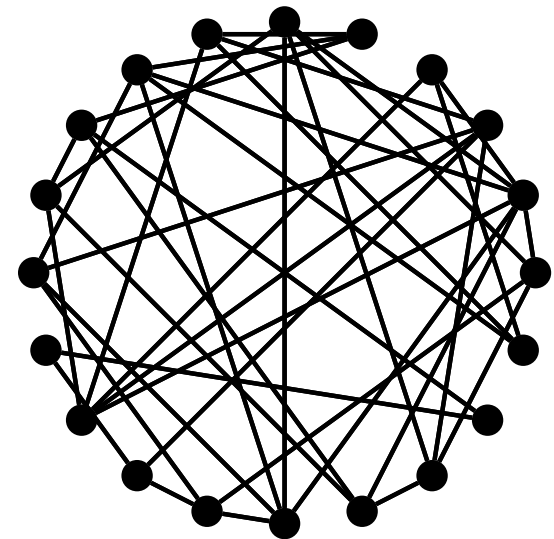
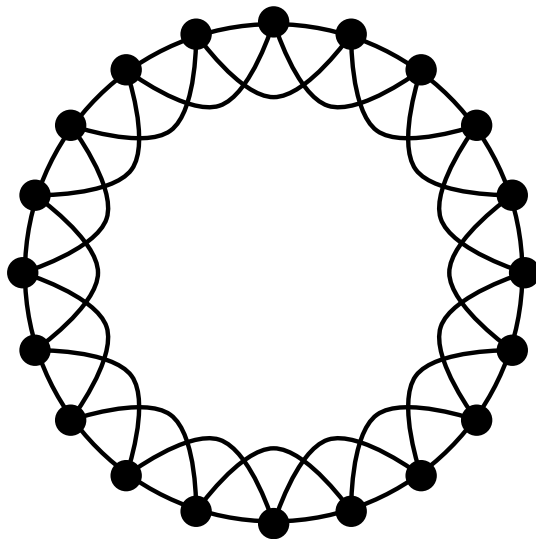
# ところが...

- 現実世界のネットワーク構造は、『規則的』ではない。
  - 規則的なネットワークでは、平均頂点間距離が  
⇒ でない
- 『ランダム』でもない。
  - 現実世界では、「友達の友達は友達」であることが多い。  
⇒ の存在



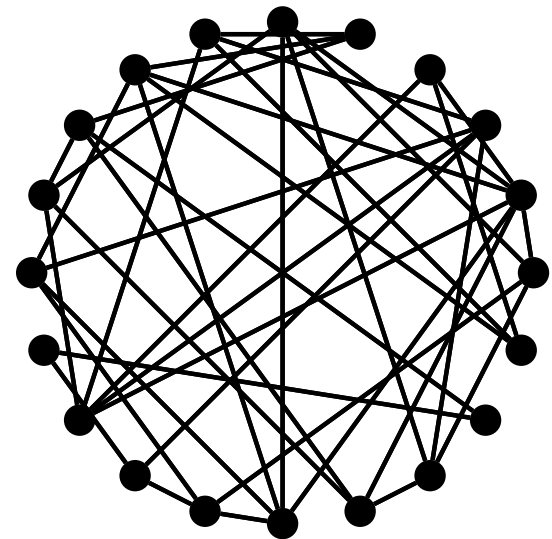
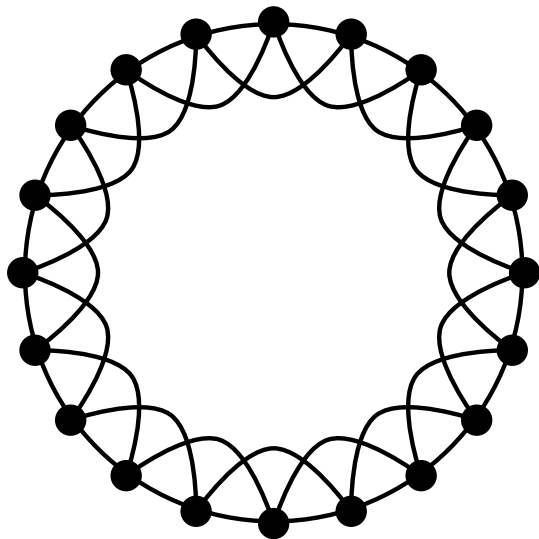
# ところが...

- 現実世界のネットワーク構造は、『規則的』ではない。
  - 規則的なネットワークでは、平均頂点間距離が 大きい  
⇒ 小さな世界 でない
- 『ランダム』でもない。
  - 現実世界では、「友達の友達は友達」であることが多い。  
⇒ の存在



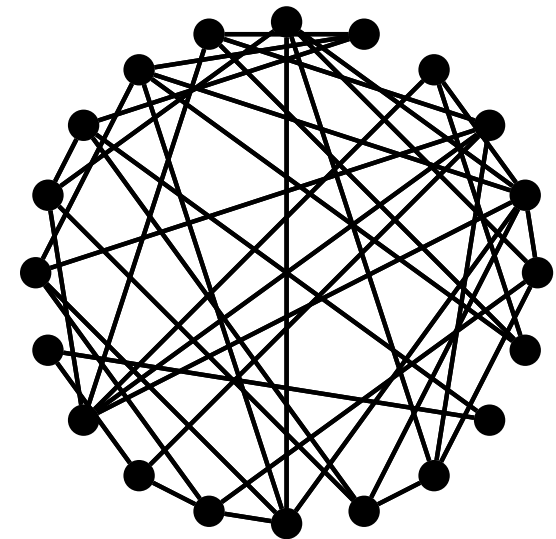
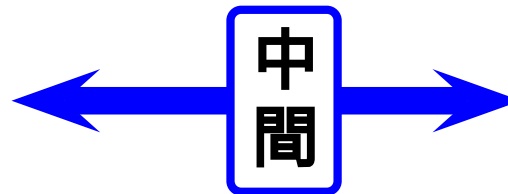
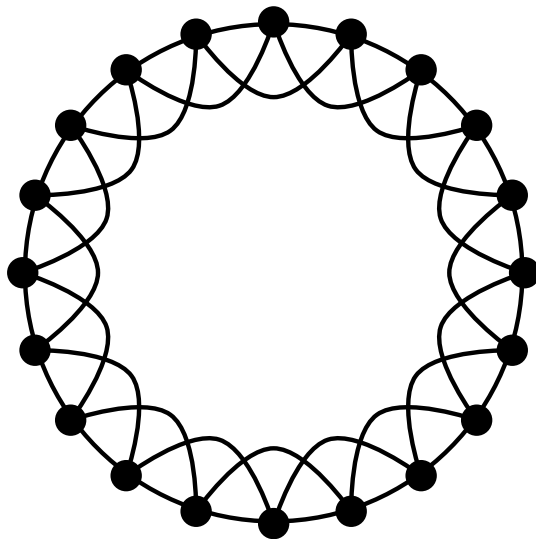
# ところが...

- 現実世界のネットワーク構造は、『規則的』ではない。
  - 規則的なネットワークでは、平均頂点間距離が 大きい  
⇒ 小さな世界 でない
- 『ランダム』でもない。
  - 現実世界では、「友達の友達は友達」であることが多い。  
⇒ クラスター性 の存在



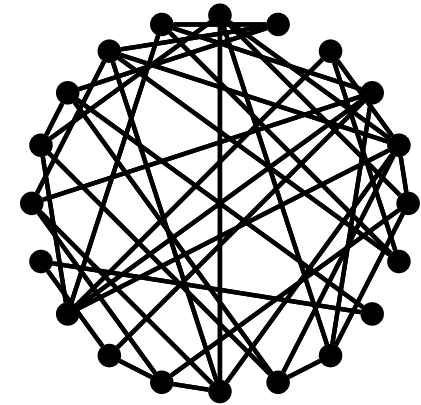
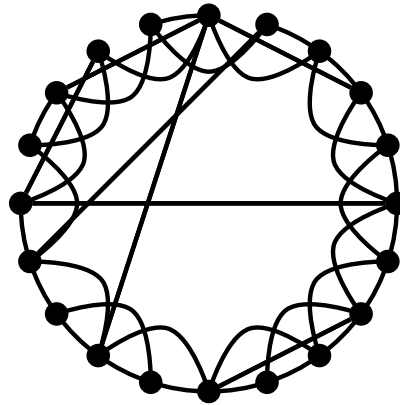
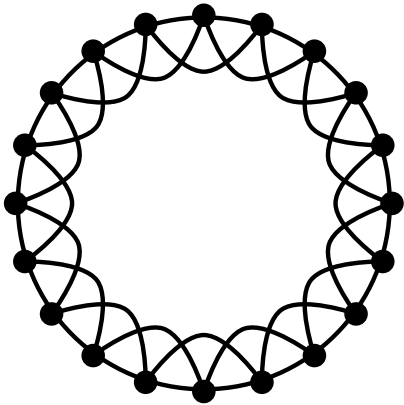
# ところが...

- 現実世界のネットワーク構造は、『規則的』ではない。
  - 規則的なネットワークでは、平均頂点間距離が 大きい  
⇒ 小さな世界 でない
- 『ランダム』でもない。
  - 現実世界では、「友達の友達は友達」であることが多い。  
⇒ クラスター性 の存在



# スモールワールドネットワーク

(Watts and Strogatz, 1998)

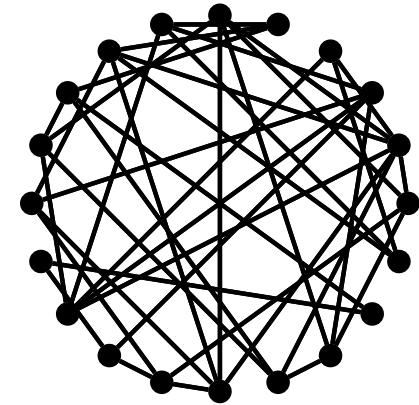
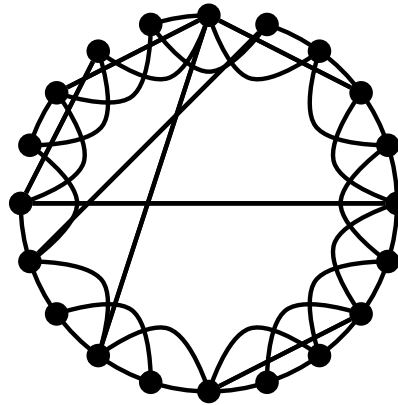
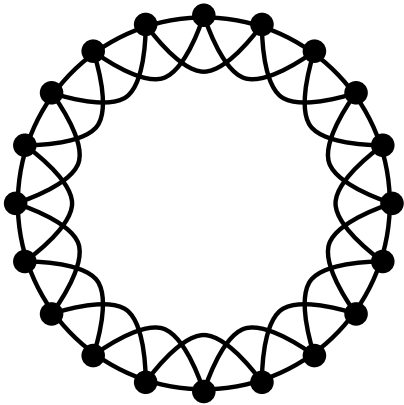


規則的でもランダムでもない  
中間の構造を有するのだが...

- 任意の二ノード間の平均距離  $L$  はネットワークのサイズ (ノード数) に比べて → 同じ
- 各ノードにおけるクラスタ性  $C$  が → 同じ

# スモールワールドネットワーク

(Watts and Strogatz, 1998)

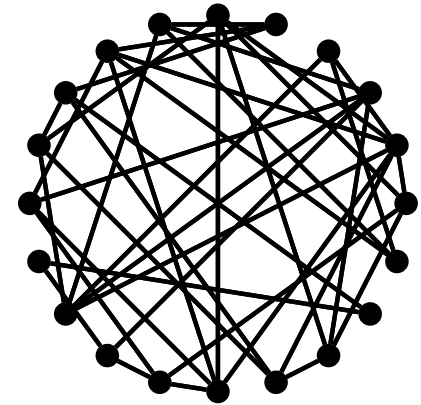
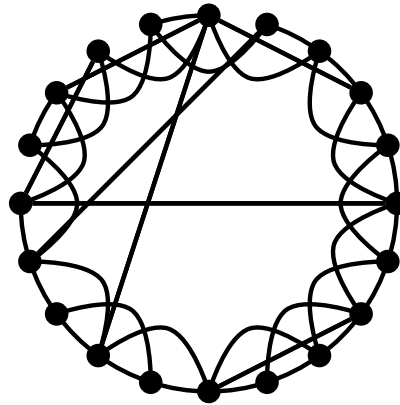
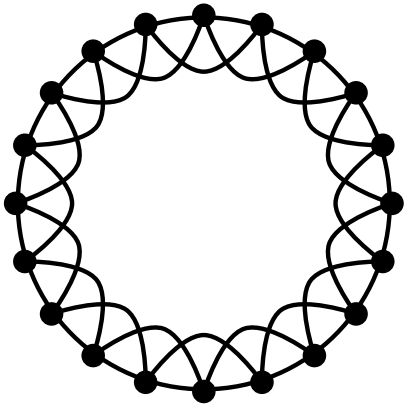


規則的でもランダムでもない  
中間の構造を有するのだが...

- 任意の二ノード間の平均距離  $L$  はネットワークのサイズ (ノード数) に比べて 小さい → 同じ
- 各ノードにおけるクラスタ性  $C$  が → 同じ

# スモールワールドネットワーク

(Watts and Strogatz, 1998)



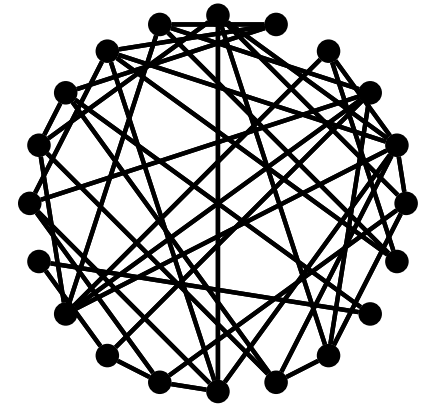
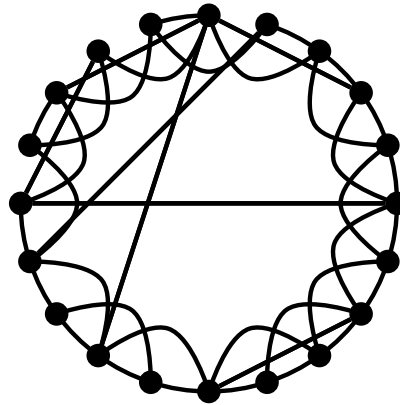
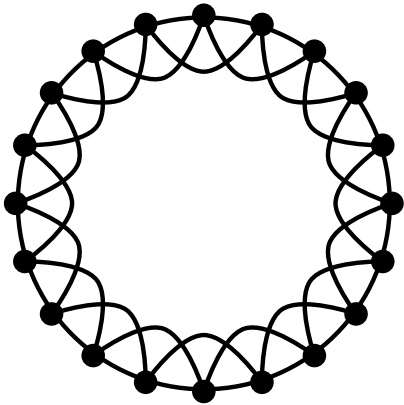
規則的でもランダムでもない  
中間の構造を有するのだが...

- 任意の二ノード間の平均距離  $L$  はネットワークのサイズ (ノード数) に比べて 小さい → ランダムグラフ と同じ
- 各ノードにおけるクラスタ性  $C$  が  
→ と同じ



# スモールワールドネットワーク

(Watts and Strogatz, 1998)

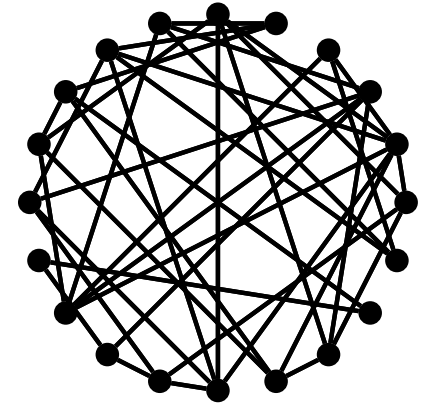
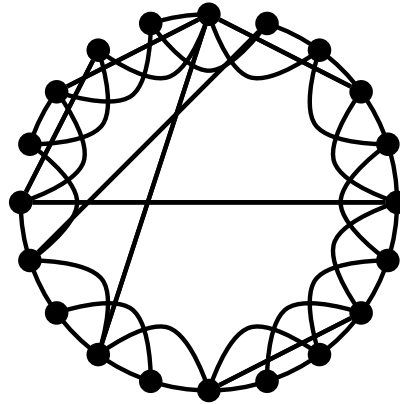
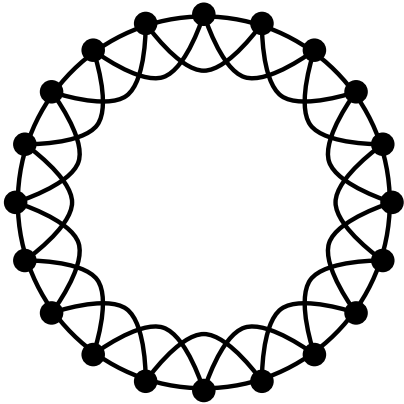


規則的でもランダムでもない  
中間の構造を有するのだが…

- 任意の二ノード間の平均距離  $L$  はネットワークのサイズ (ノード数) に比べて 小さい → ランダムグラフ と同じ
- 各ノードにおけるクラスタ性  $C$  が 高い  
→ と同じ

# スモールワールドネットワーク

(Watts and Strogatz, 1998)



規則的でもランダムでもない  
中間の構造を有するのだが…

- 任意の二ノード間の平均距離  $L$  はネットワークのサイズ (ノード数) に比べて 小さい → ランダムグラフ と同じ
- 各ノードにおけるクラスタ性  $C$  が 高い  
→ 規則的なグラフ と同じ

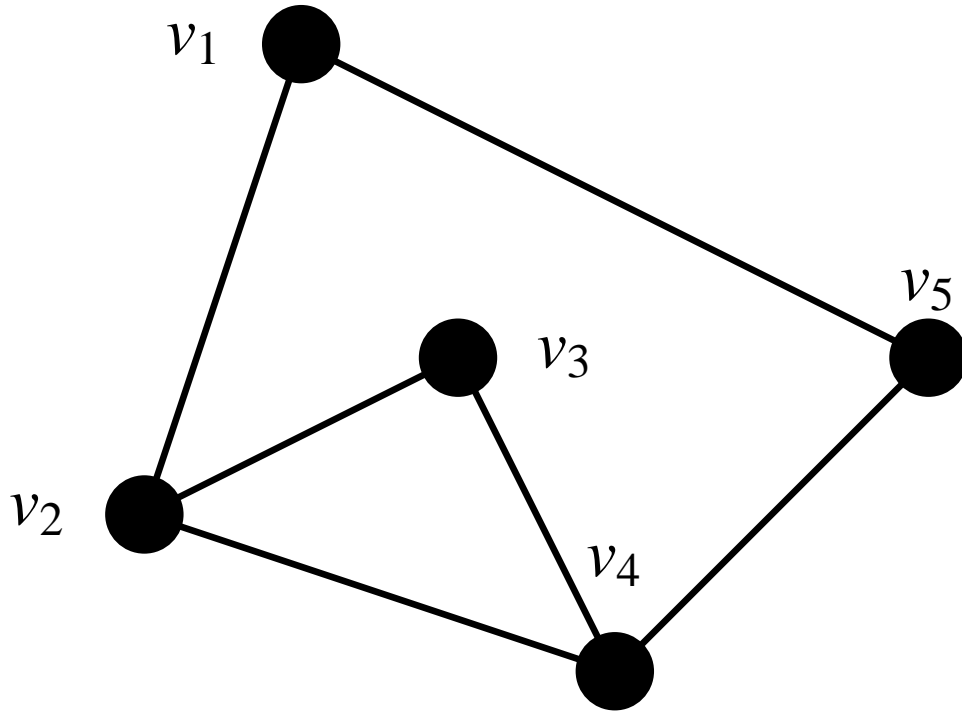
# 現実世界のスモールワールドネットワーク

	ノード数	$L_{\text{actual}}$	$L_{\text{random}}$	$C_{\text{actual}}$	$C_{\text{random}}$
映画俳優	225,226	3.65	2.99	0.79	0.00027
送電網	4,941	18.7	12.4	0.080	0.005
神経回路網	282	2.65	2.25	0.28	0.05

- 任意の二ノード間の平均距離  $L$  はネットワークのサイズ(ノード数)に比べ小さい(ランダムグラフと同じ)
- 各ノードにおけるクラスタ性  $C$  は大きい(ランダムグラフではほぼ0)

# 現実世界のネットワークを特徴づけるもう一つの視点

⇒ ネットワークの次数分布



$$k_1 =$$

$$k_2 =$$

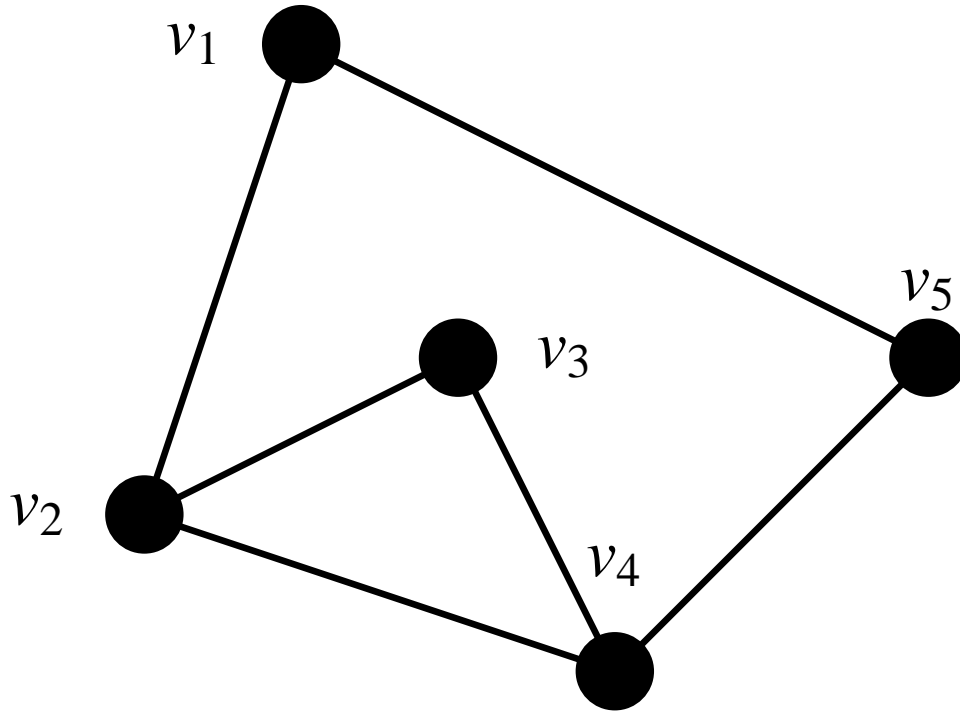
$$k_3 =$$

$$k_4 =$$

$$k_5 =$$

# 現実世界のネットワークを特徴づけるもう一つの視点

⇒ ネットワークの次数分布



$$k_1 = 2$$

$$k_2 =$$

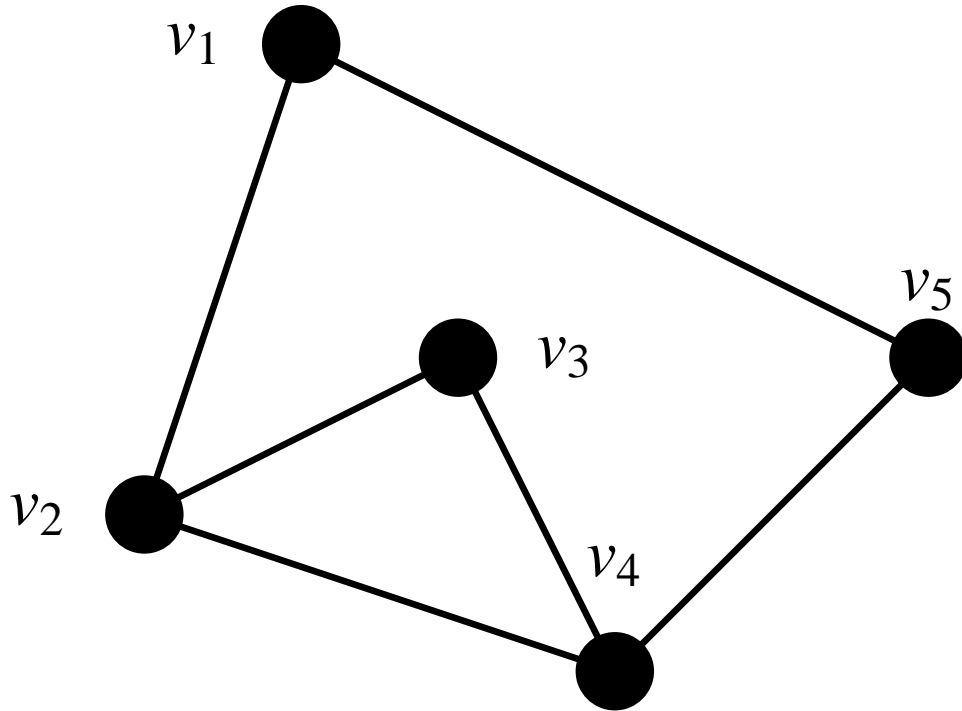
$$k_3 =$$

$$k_4 =$$

$$k_5 =$$

# 現実世界のネットワークを特徴づけるもう一つの視点

⇒ ネットワークの次数分布



$$k_1 = 2$$

$$k_2 = 3$$

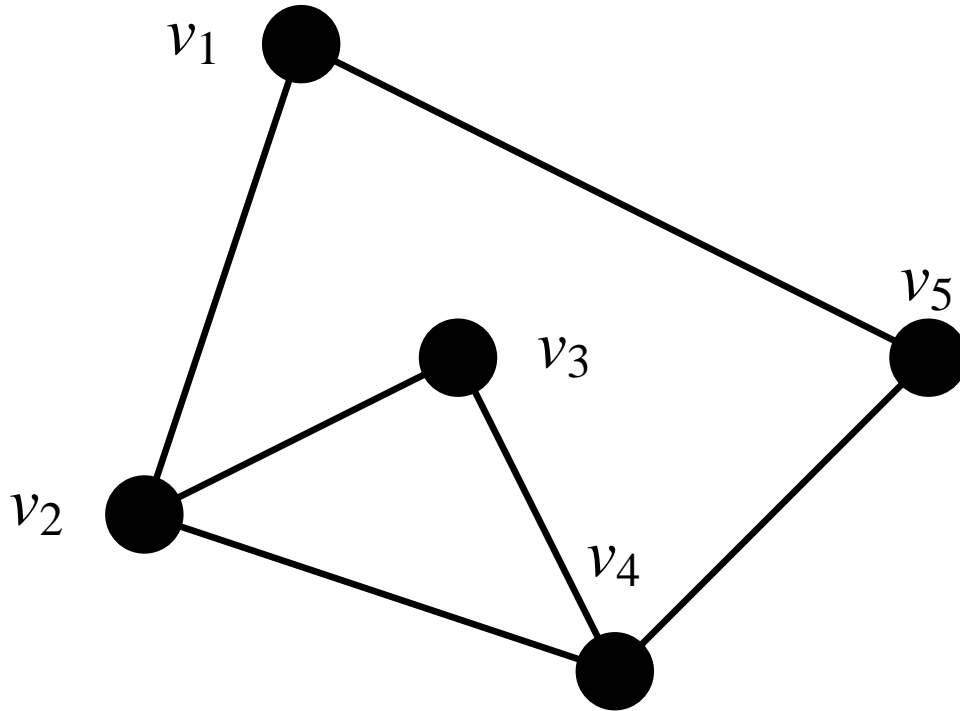
$$k_3 =$$

$$k_4 =$$

$$k_5 =$$

# 現実世界のネットワークを特徴づけるもう一つの視点

⇒ ネットワークの次数分布



$$k_1 = 2$$

$$k_2 = 3$$

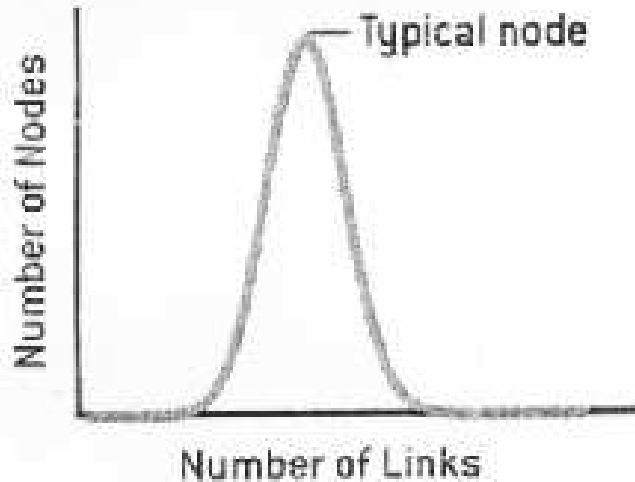
$$k_3 = 2$$

$$k_4 = 3$$

$$k_5 = 2$$

# ネットワークの次数分布

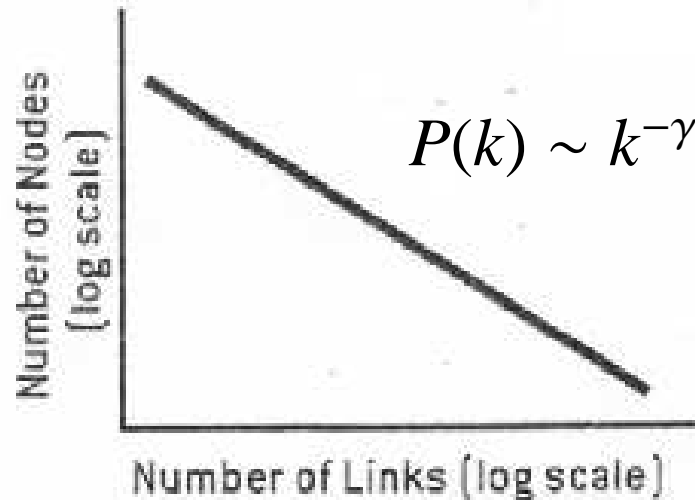
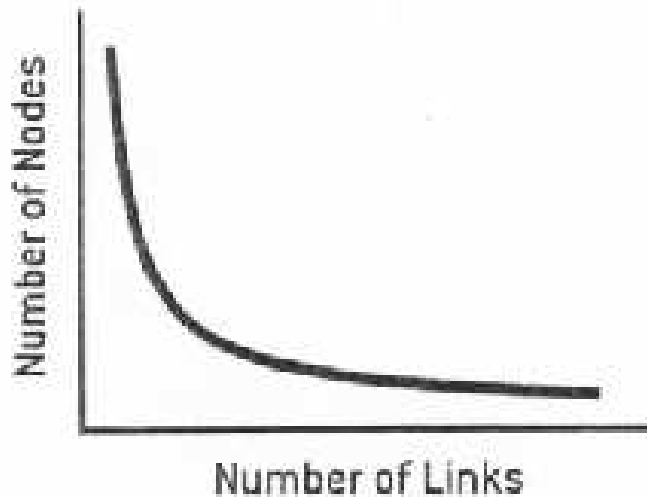
## 今までのネットワーク



- ❑ 多数のリンクを持つ **が存在**
- ❑ 次数分布が **になる**



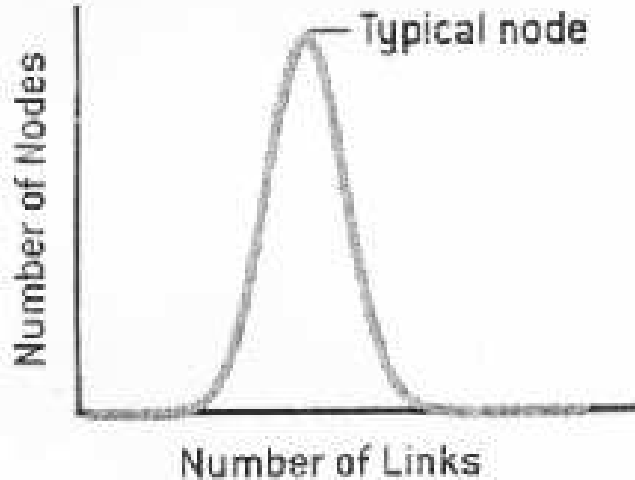
## 実際のネットワーク





# ネットワークの次数分布

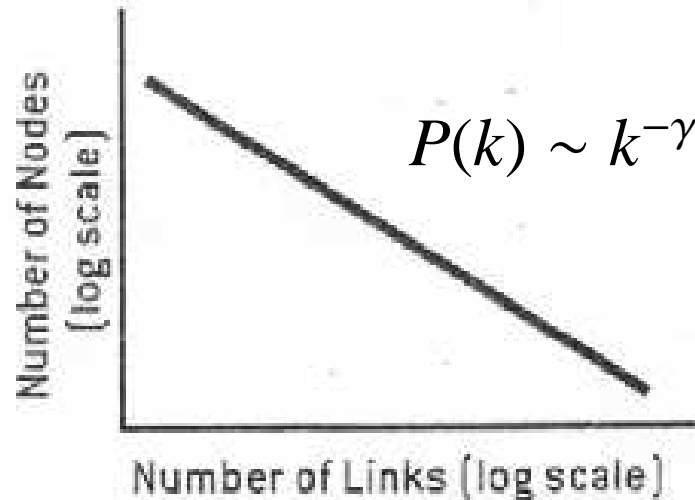
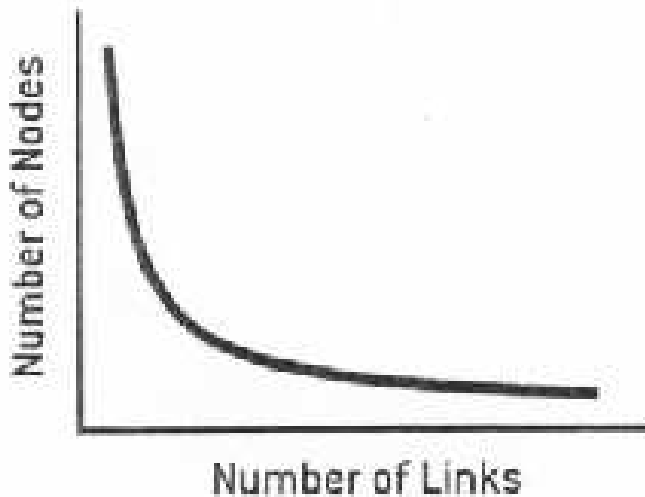
## 今までのネットワーク



- ❑ 多数のリンクを持つ ハブ が存在
- ❑ 次数分布が                          になる



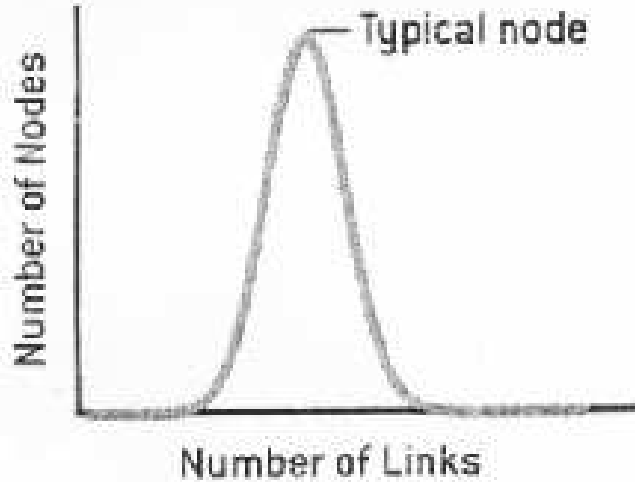
## 実際のネットワーク



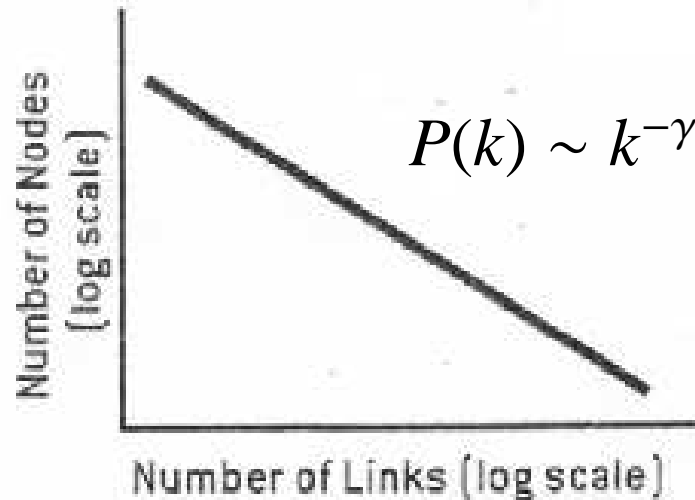
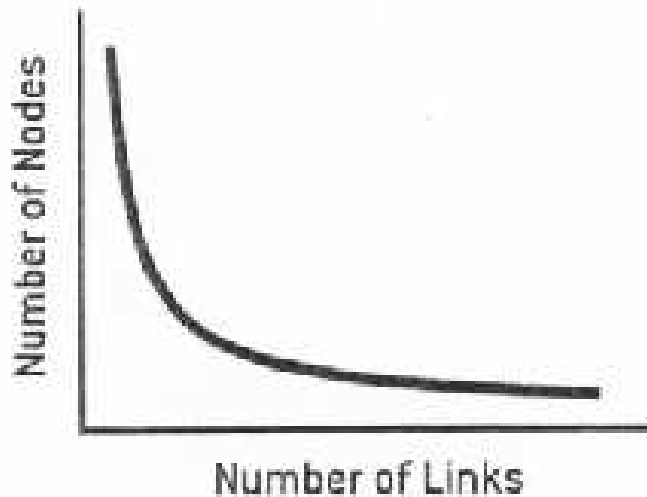
# ネットワークの次数分布

## 今までのネットワーク

- ❑ 多数のリンクを持つ ハブ が存在
- ❑ 次数分布が べき分布 になる

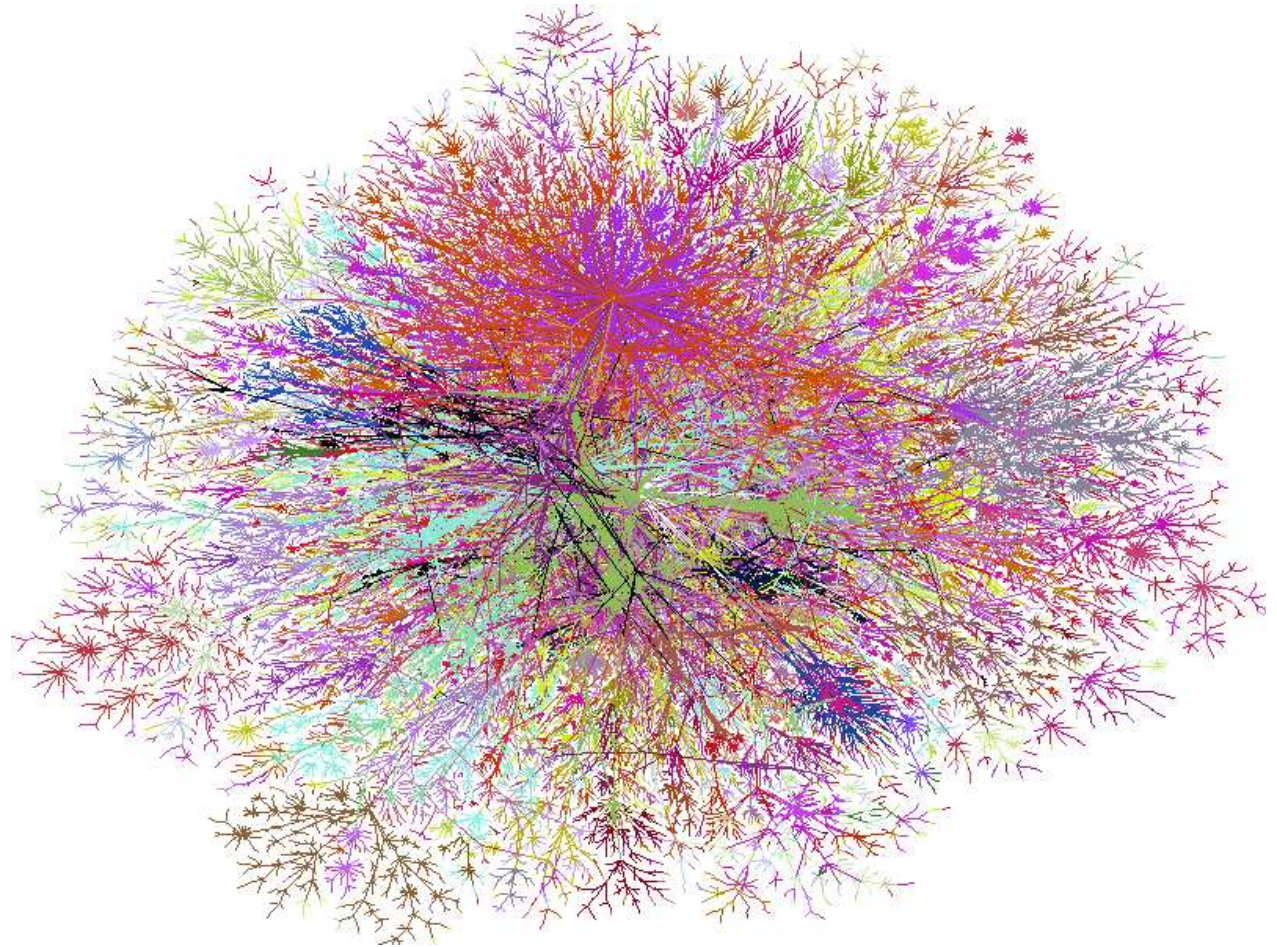


## 実際のネットワーク



# 実際のネットワーク構造

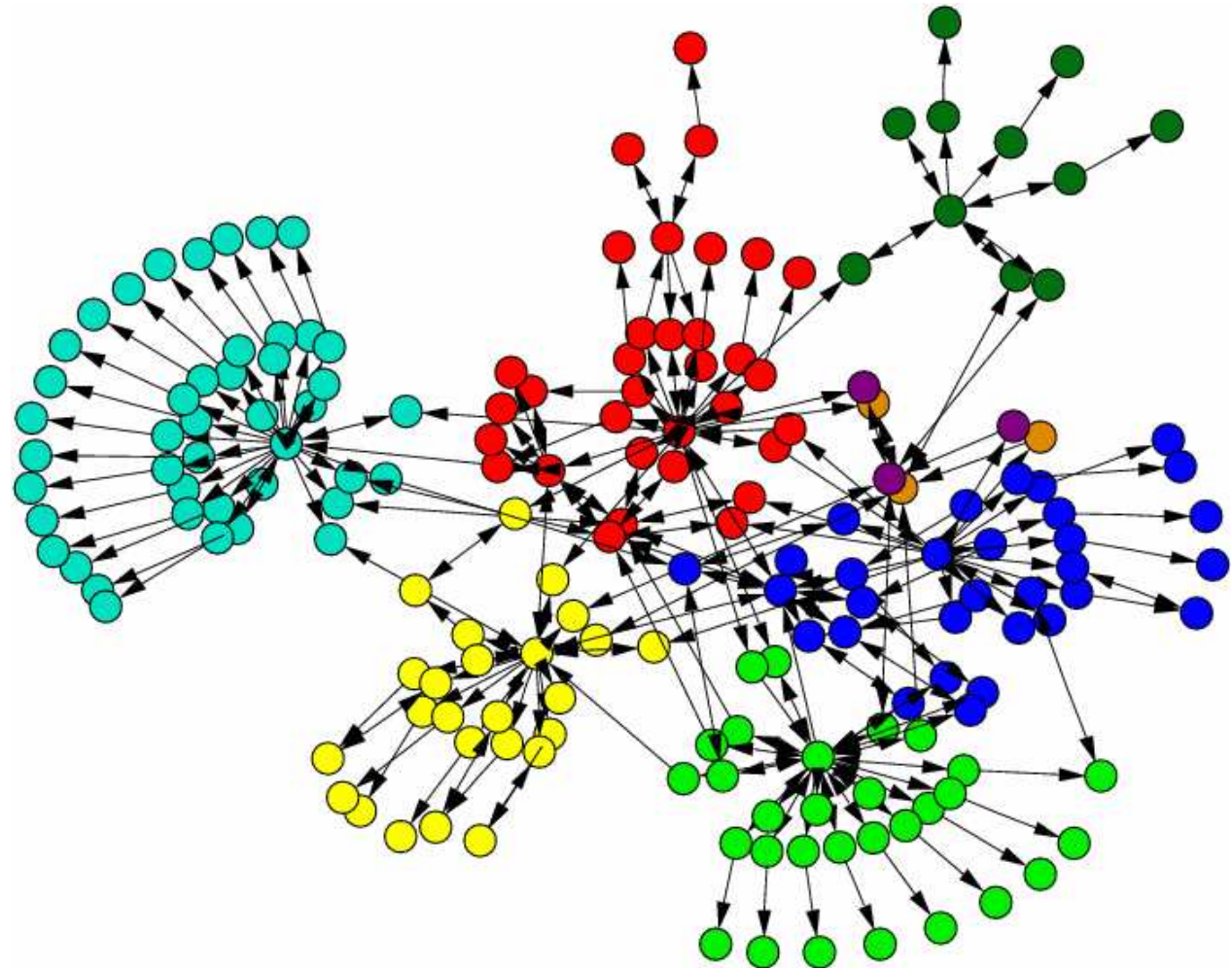
- インターネット
- ウェブページ
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染





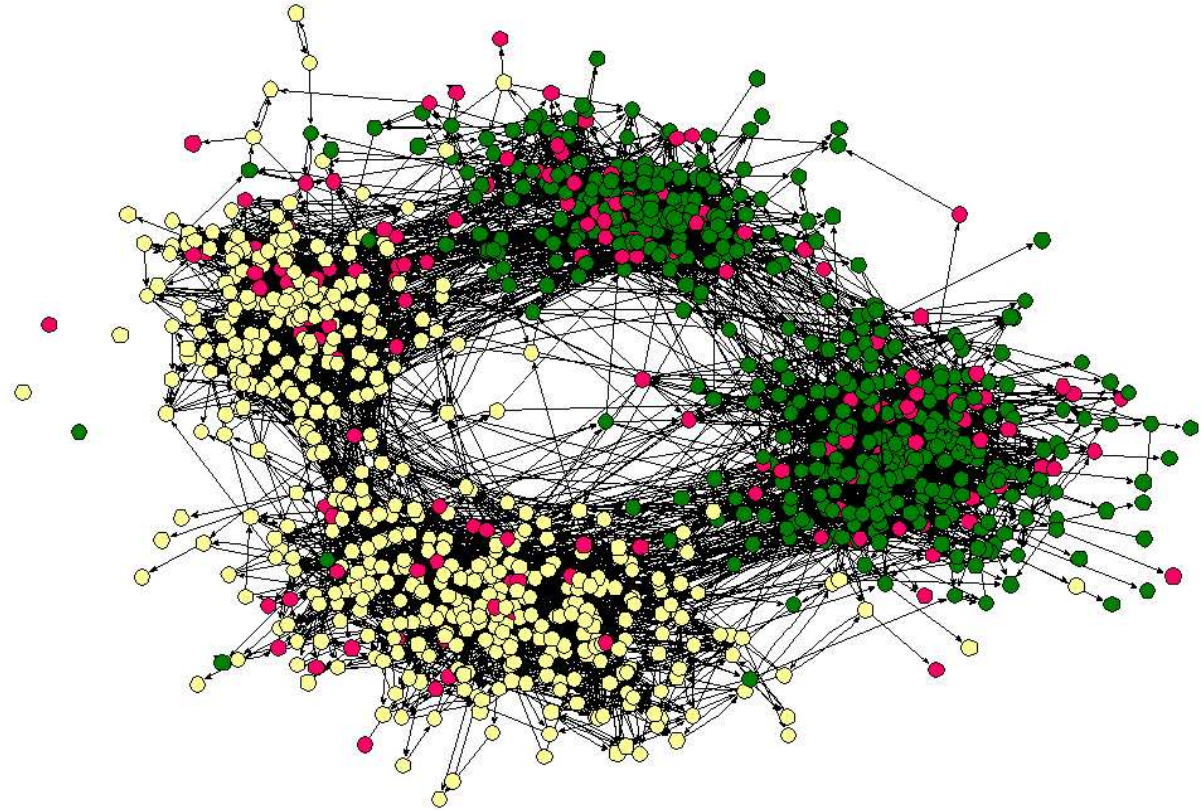
# 実際のネットワーク構造

- インターネット
- **ウェブページ**
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染



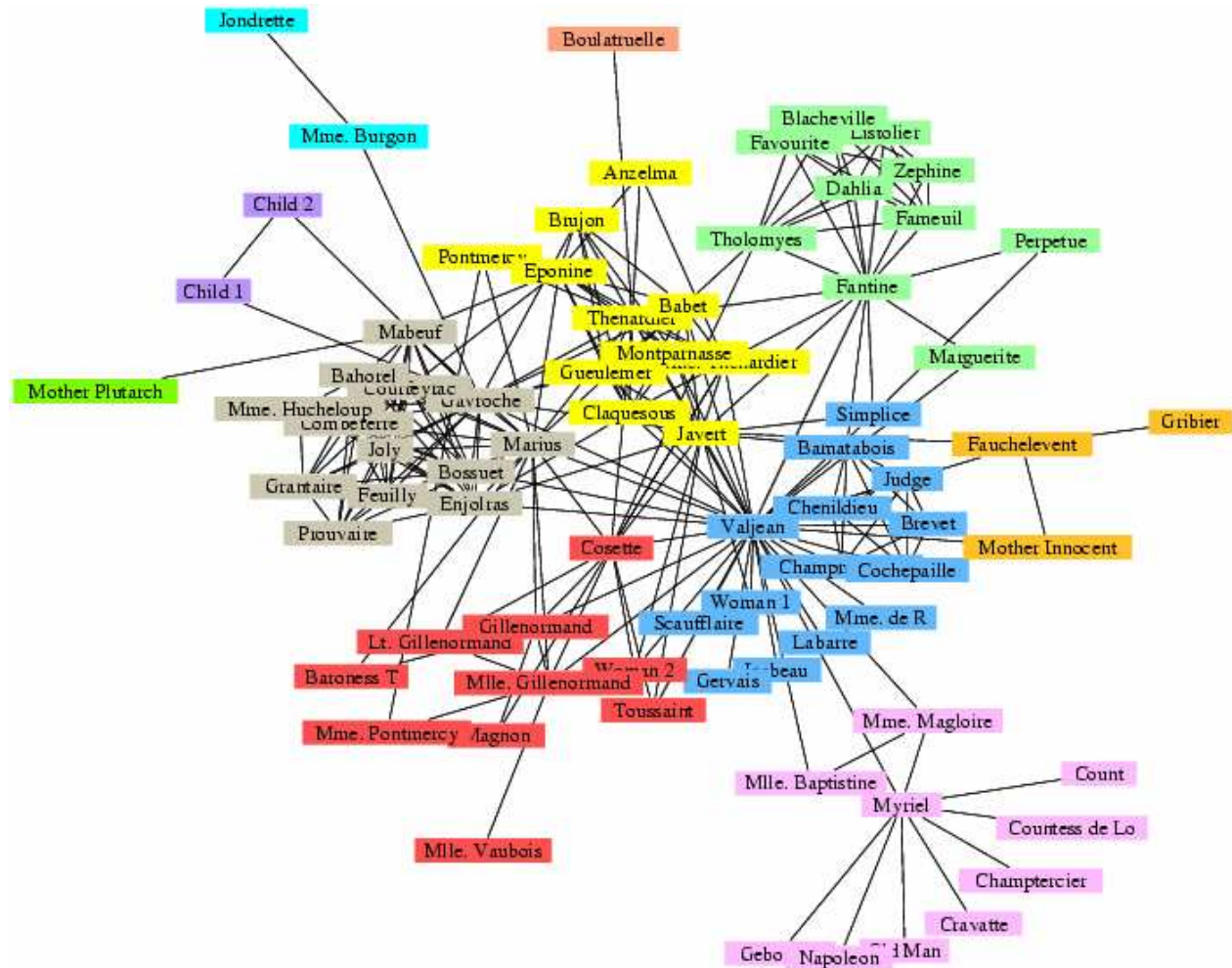
# 実際のネットワーク構造

- インターネット
- ウェブページ
- **友人関係**
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染



# 実際のネットワーク構造

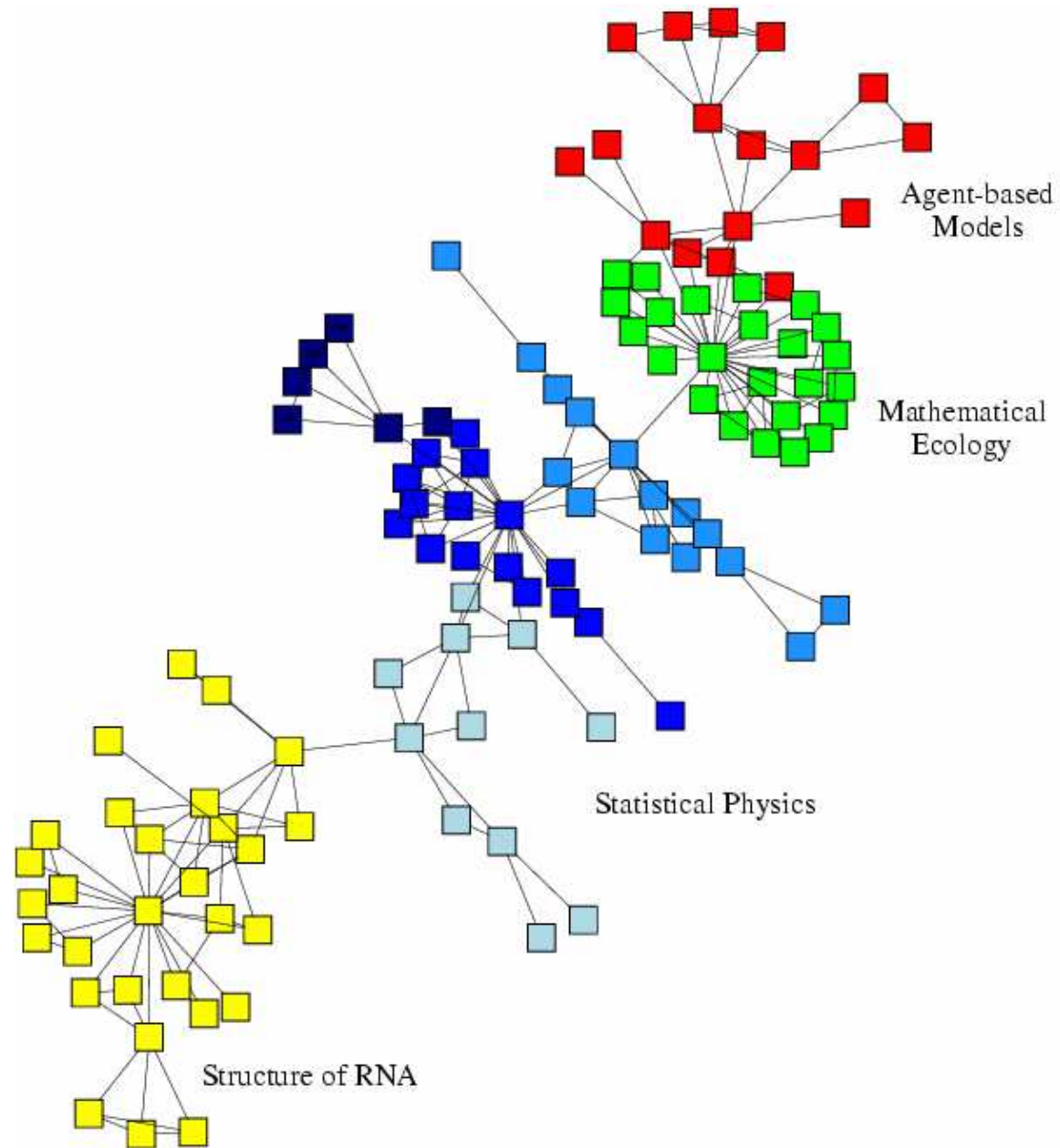
- ❑ インターネット
- ❑ ウェブページ
- ❑ 友人関係
- ❑ **ああ無情**
- ❑ 共同研究
- ❑ 結核感染
- ❑ 性交渉





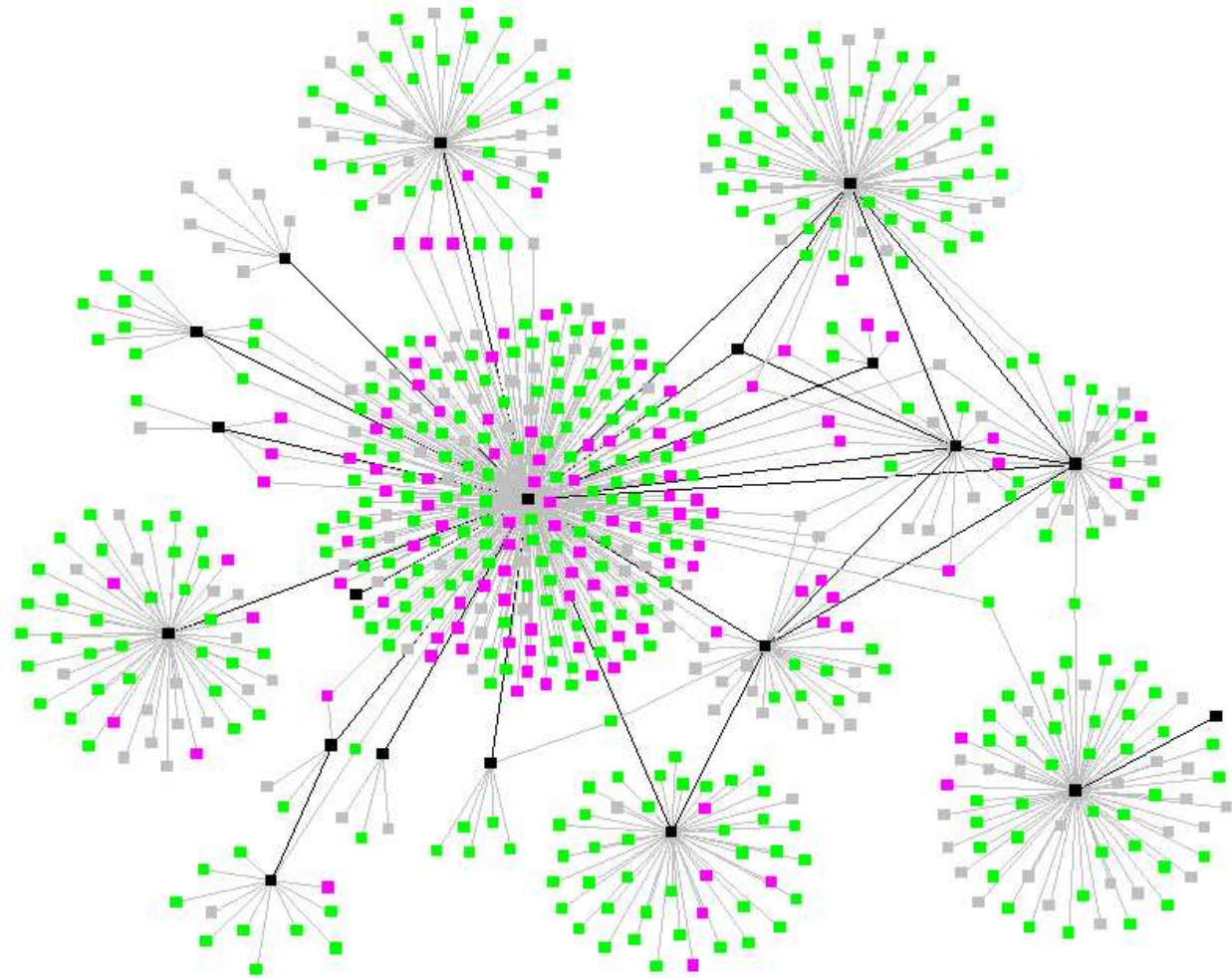
# 実際のネットワーク構造

- インターネット
- ウェブページ
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染



# 実際のネットワーク構造

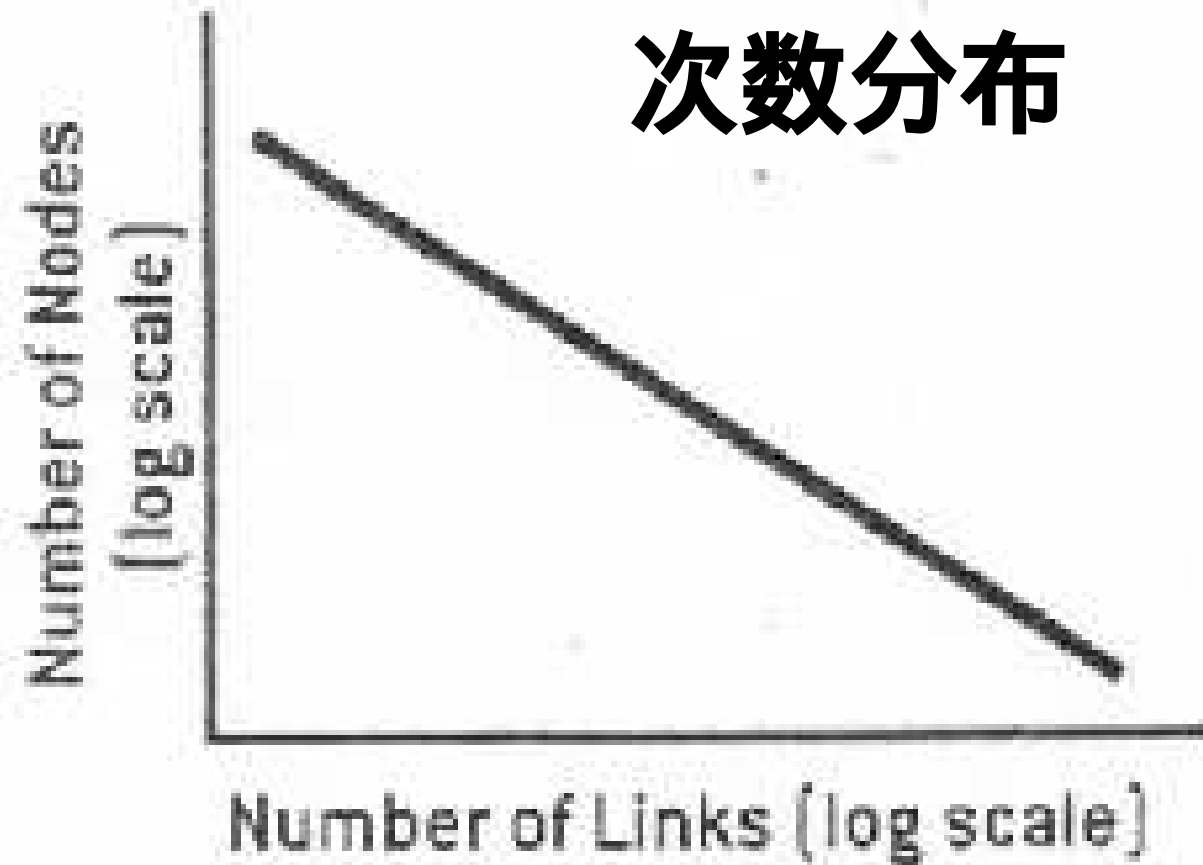
- インターネット
- ウェブページ
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- **結核感染**





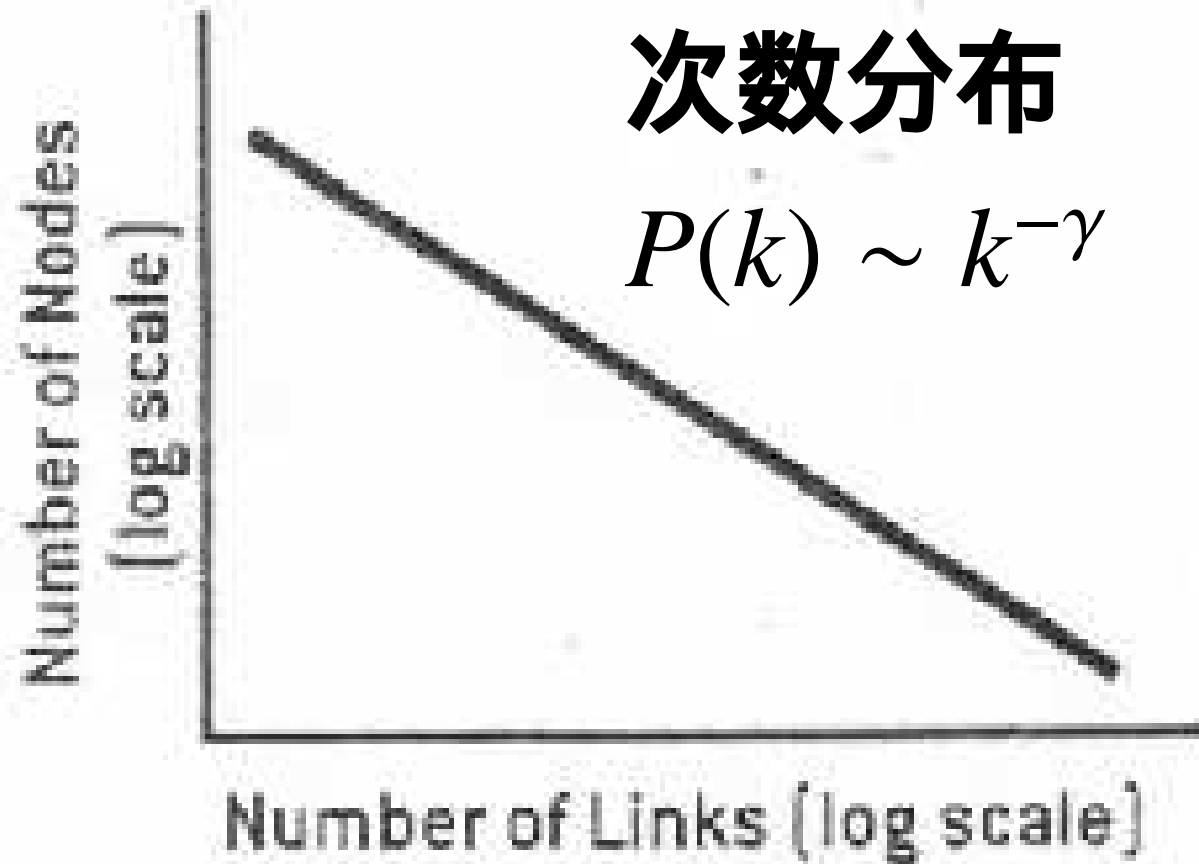
# 実際のネットワーク構造

- インターネット
- ウェブページ
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染



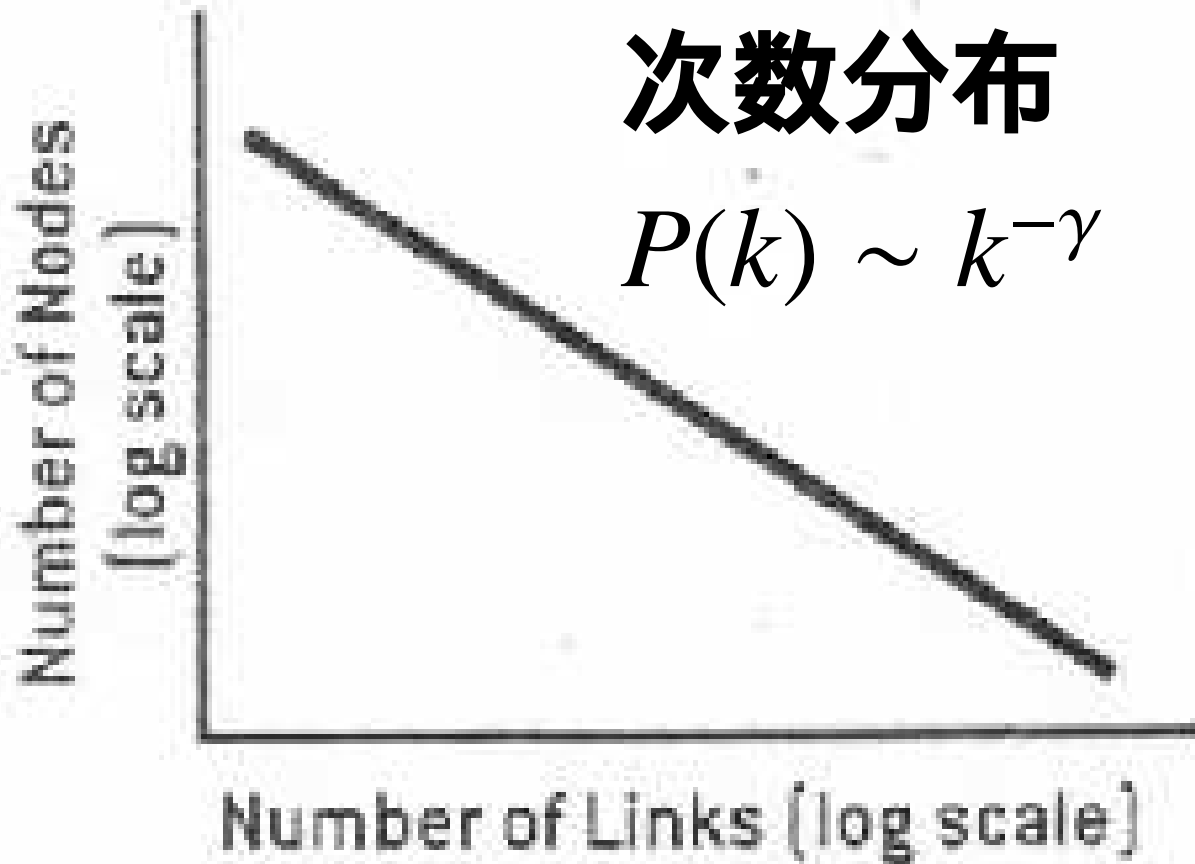
# 実際のネットワーク構造

- インターネット
- ウェブページ
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染



# 実際のネットワーク構造

- インターネット
- ウェブページ
- 友人関係
- ああ無情
- 共同研究
- 結核感染

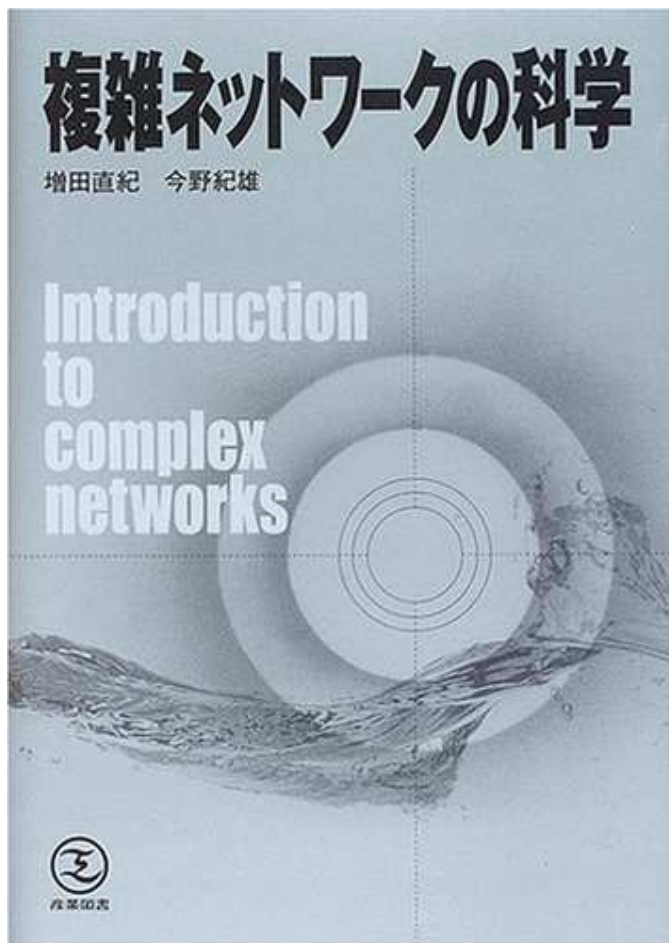


スケールフリーネットワーク

# 現実問題との関わり …

- ❑ なぜインターネットはルータの故障に対して頑健なのか？  
一日平均約百台のルータが故障している。
- ❑ なぜ金持ちはますます金持ちになるのか？  
80 対 20 の法則 (パレートの法則)
- ❑ 金持ちがますます成功する社会で、  
新参者はどうすれば生き残れるのか？
- ❑ なぜマイクロソフトは一人勝ちしたのか？
- ❑ 有限な予算で病気の感染拡大を防ぐにはどうすべきか？
- ❑ ブラックアウトを防ぐ手立てはあるのか？

# 書籍紹介



増田 直紀，今野 紀雄 著: 複雑ネットワークの科学，産業図書，2005; 増田 直紀，今野 紀雄 著: 「複雑ネットワーク」とは何か，講談社ブルーバックス，2006

# 今日のお話はそろそろおしまい…

1. 手紙渡しの実験  $\Rightarrow$  小さな世界の実例
2. ケビン・ベーコン・ゲーム  $\Rightarrow$  小さな世界の実例
3. グラフ理論 (の歴史)
4. 現実世界に存在するネットワークの特徴
  - (a) 規則的ではない
  - (b) ランダムではない
  - (c) スモールワールド？
  - (d) スケールフリー？

# 最後に—皆さんに考えてほしいこと—

- ➡ 中途半端なコンピュータの知識なら無くても良い。  
コンピュータの OS といえば Windows である。  
Windows で setup をダブルクリックできるのでバッチリだ。  
UNIX? Makefile? configure? 何じゃそりゃ?
- ➡ 必要なのは数学力 (論理力), 物理的なセンス
  - ・ゲーム, CG, ネットワーク, どんなものも時間の推移と共に変化!
  - ・アルゴリズムの考案には論理力が必須

微分積分が出来ても, 情報システム工学科では意味あらへんわ…  
ソフトウェアを書くのに, 物理なんか関係ないじゃん…
- ➡ 語学力も必要
  - ・最低限, 日本語と英語。出来れば第二外国語。
  - ・外国語の習得には論理力も必要。

自動翻訳機がそのうちに出るから英語などできなくても良い。  
辞書は goo とか excite などの辞書を使えば十分だ。  
単語の意味を調べて, あとは適当に雰囲気です…

# 最後に—皆さんに考えてほしいこと—

➡ 中途半端なコンピュータの知識なら無くても良い。

- × コンピュータの OS といえば Windows である。
- × Windows で setup をダブルクリックできるのでバッチリだ。
- × UNIX? Makefile? configure? 何じゃそりゃ?

➡ 必要なのは数学力 (論理力), 物理的なセンス

- ・ ゲーム, CG, ネットワーク, どんなものも時間の推移と共に変化!
- ・ アルゴリズムの考案には論理力が必須

微分積分が出来ても, 情報システム工学科では意味あらへんわ…  
ソフトウェアを書くのに, 物理なんか関係ないじゃん…

➡ 語学力も必要

- ・ 最低限, 日本語と英語。出来れば第二外国語。
- ・ 外国語の習得には論理力も必要。

自動翻訳機がそのうちに出るから英語などできなくても良い。  
辞書は goo とか excite などの辞書を使えば十分だ。  
単語の意味を調べて, あとは適当に雰囲気です…



# 最後に—皆さんに考えてほしいこと—

- ☞ 中途半端なコンピュータの知識なら無くても良い。
  - × コンピュータの OS といえば Windows である。
  - × Windows で setup をダブルクリックできるのでバッチリだ。
  - × UNIX? Makefile? configure? 何じゃそりゃ?
- ☞ 必要なのは数学力 (論理力), 物理的なセンス
  - ・ ゲーム, CG, ネットワーク, どんなものも時間の推移と共に変化!
  - ・ アルゴリズムの考案には論理力が必須
  - × 微分積分が出来ても, 情報システム工学科では意味あらへんわ...
  - × ソフトウェアを書くのに, 物理なんか関係ないじゃん...
- ☞ 語学力も必要
  - ・ 最低限, 日本語と英語。出来れば第二外国語。
  - ・ 外国語の習得には論理力も必要。

自動翻訳機がそのうちに出るから英語などできなくても良い。  
辞書は goo とか excite などの辞書を使えば十分だ。  
単語の意味を調べて, あとは適当に雰囲気です...

# 最後に—皆さんに考えてほしいこと—

- ☞ 中途半端なコンピュータの知識なら無くても良い。
  - × コンピュータの OS といえば Windows である。
  - × Windows で setup をダブルクリックできるのでバッチリだ。
  - × UNIX? Makefile? configure? 何じゃそりゃ?
- ☞ 必要なのは数学力 (論理力), 物理的なセンス
  - ・ ゲーム, CG, ネットワーク, どんなものも時間の推移と共に変化!
  - ・ アルゴリズムの考案には論理力が必須
  - × 微分積分が出来ても, 情報システム工学科では意味あらへんわ...
  - × ソフトウェアを書くのに, 物理なんか関係ないじゃん...
- ☞ 語学力も必要
  - ・ 最低限, 日本語と英語。出来れば第二外国語。
  - ・ 外国語の習得には論理力も必要。
  - × 自動翻訳機がそのうちに出るから英語などできなくても良い。
  - × 辞書は goo とか excite などの辞書を使えば十分だ。
  - × 単語の意味を調べて, あとは適当に雰囲気です...

**今日の模擬講義に関する質問・コメントは随時受け付けます。**

- ❑ **メール** : tohru@nls.ics.saitama-u.ac.jp
- ❑ **居室** : 埼玉大学 総合研究棟 5F 506 号室
- ❑ **電話** : 048-858-3577
- ❑ **今日の授業で使ったスライドの PDF ファイルを , 池口の講義サポートページに置いておきます。**

<http://www.nls.ics.saitama-u.ac.jp/~tohru/Lectures/>  
から , どうぞ .

ユーザ: saidai

パスワード: ics

