

# 『モデリング・シミュレーション入門』

第10回 成長するネットワークのシミュレーション

いば たかし

**井庭 崇**

慶應義塾大学総合政策学部 専任講師  
iba@sfc.keio.ac.jp  
<http://www.sfc.keio.ac.jp/~iba/lecture/>

## 自律・分散・協調



- ≠ 集中システム
  
- 自律 (Autonomous)
- 分散 (Distributed)
- 協調 (Cooperative)
  
- 全体を統括する主体をもたずに、分散して存在する各要素が自律的に行動し、協調的に相互作用しながら、全体としての振る舞いをするシステム

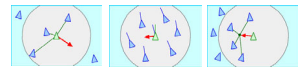
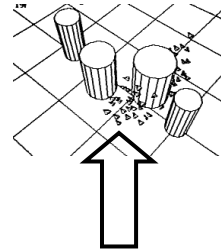
## Boid:鳥の群れのシミュレーション



現象





内部メカニズム

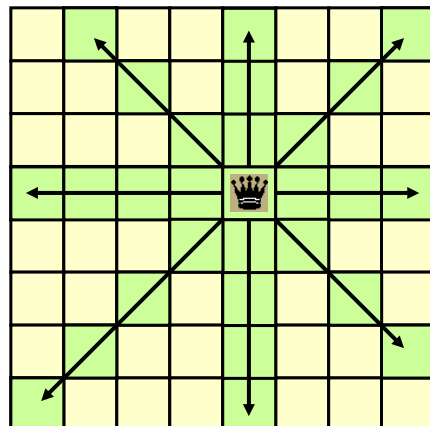


## N-Queen: 協調的問題解決



 チェスのクイーンは、縦横斜めに、好きなだけ動くことができる。

 「 $N \times N$  ( $N \geq 4$ ) のチェス盤に  $N$  個のクイーンを配置しなさい。ただし、それぞれのクイーンの効き筋には、他のクイーンがひとつもないようにすること。」



# 『モデリング・シミュレーション入門』

## 第10回 成長するネットワークのシミュレーション

いば たかし

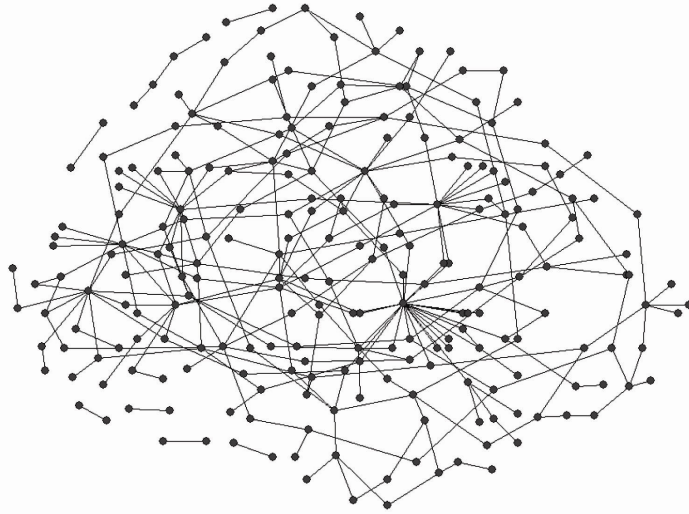
**井庭 崇**

慶應義塾大学総合政策学部 専任講師  
iba@sfc.keio.ac.jp  
<http://www.sfc.keio.ac.jp/~iba/lecture/>

## 授業スケジュール

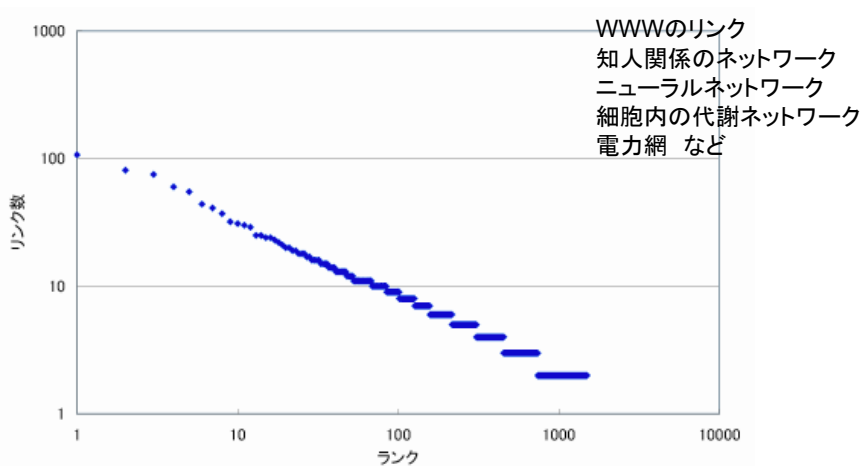
- 第1回(10/1) イン트로ダクション
- 第2回(10/8) モデリングとは
- 第3回(10/15) 数理モデリング
- 第4回(10/22) 非線形とカオス
- 第5回(11/5) オートマトン(状態機械)
- 第6回(11/12) オブジェクト指向モデリング  
(三田祭休み)
- 第7回(11/26) オブジェクト指向モデリングとプログラミング
- 第8回(12/3) シミュレーションによる分析
- 第9回(12/10) 自律分散協調システムと自己組織化のシミュレーション
- 第10回(12/17) 成長するネットワークのシミュレーション
- 第11回(12/18) 補講: ゲストスピーカー講演  
(冬休み)
- 第12回(1/7) ニューラルネットワークによる学習のシミュレーション
- 第13回(1/14) 遺伝的アルゴリズムによる進化のシミュレーション

## ネットワークの成長と、スケールフリー

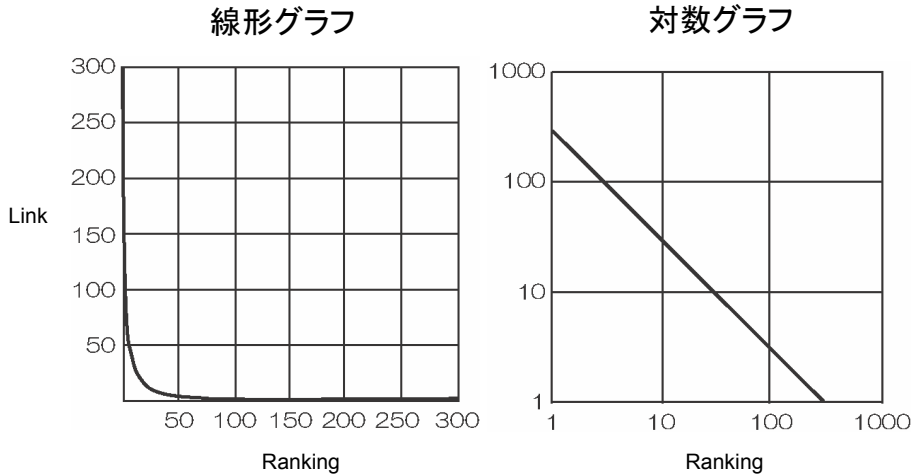


## ネットワークの成長と、スケールフリー

- 自然・社会に存在するネットワークは、ハブをもつスケールフリー・ネットワークだということが知られている。

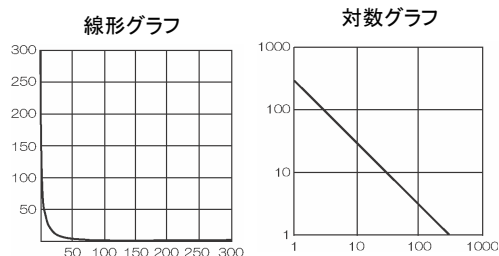


## 両対数グラフ



## べき乗則(べき法則: Power Law)

- 重要な点は、「小さな度数をもつたくさんの事象」と「大きな度数をもつ少数の事象」が共存
- 釣鐘型(正規分布)では存在しないハブ(稀有な事象)が、べき乗則の分布では、存在が許される。
- 平均的なノードは存在しない。



## スケールフリーネットワーク

- 「ベキ法則は、系に特徴的なスケールとか、系の代表的ノードとかいう考えを捨てるようわれわれに迫る。
- ヒエラルキーがなめらかに移行する以上、平均的ノードを指定することも、系に特徴的なスケールを決めることもできないからだ。
- われわれの研究グループが、ベキ法則に従うネットワークを“スケールフリー(尺度のない)”と呼ぶことにしたのはこのためである。」

p.104

『新ネットワーク思考—世界のしくみを読み解く』(アルバート・ラズロ・バラバシ, NHK出版, 2002)

## ランダムネットワークの分布は・・・

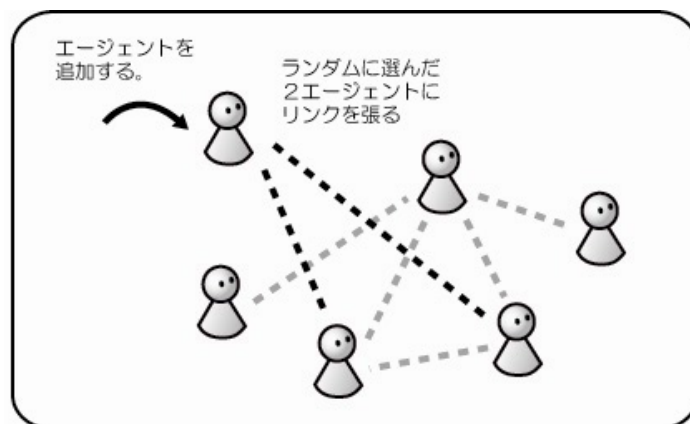
- ランダムネットワークの分布では、大多数のノードが同数のリンクをもち、平均から大きくはずれるノードは少ない。
- ノードがもつリンク数に「スケール(尺度)」が存在する

『新ネットワーク思考—世界のしくみを読み解く』(アルバート・ラズロ・バラバシ, NHK出版, 2002)

## 成長するネットワークのモデル Barabasiモデル

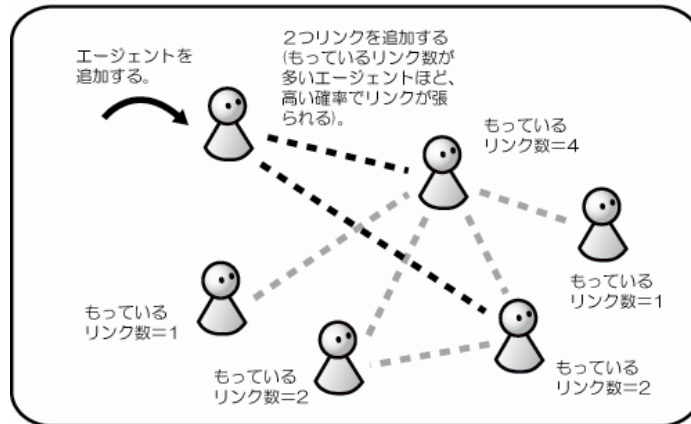
### ランダム選択モデル(Random Attachment)

RandomAttachment 方式では、べき乗則に従うネットワークは作成できない



## 優先的選択モデル(Preferential Attachment)

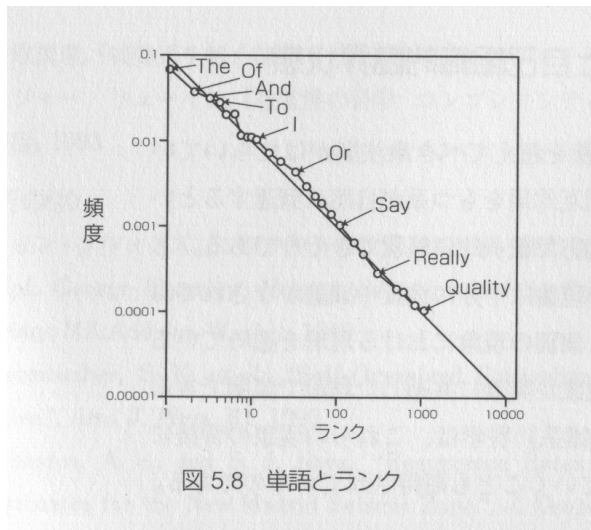
Preferential Attachment 方式によってべき乗則に従うネットワークを作成できる



べき乗分布  
自然界や社会の「ネットワーク」  
にみられる統計的特徴

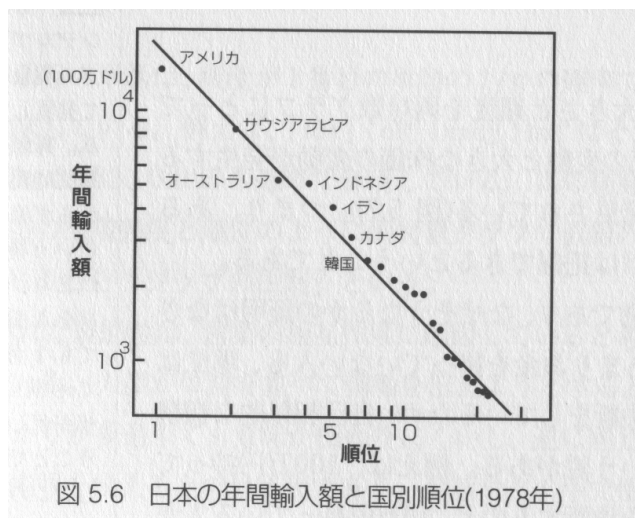


## ベキ乗分布: 単語の出現頻度



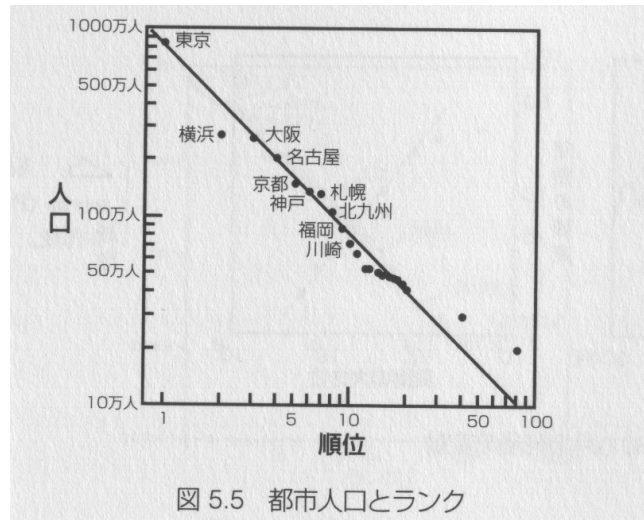
井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## ベキ乗分布: 年間輸入額



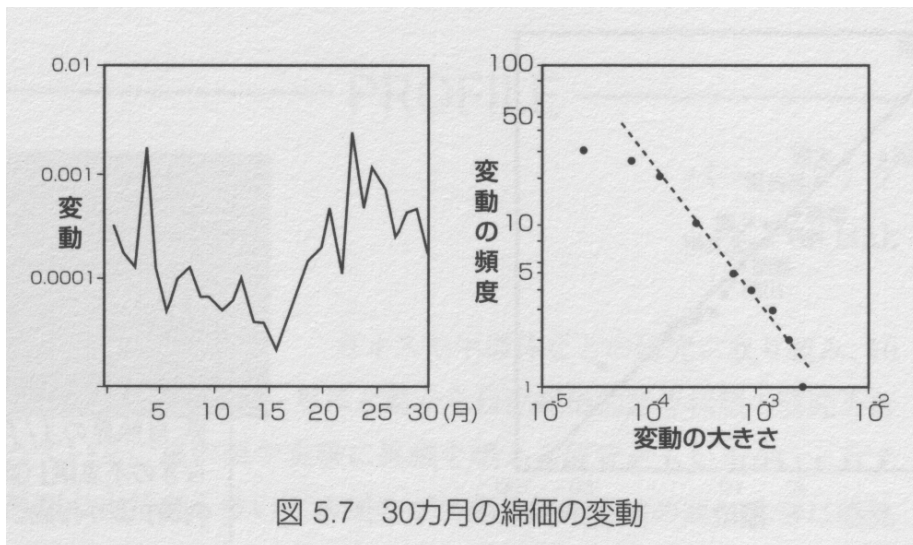
井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## ベキ乗分布:都市人口



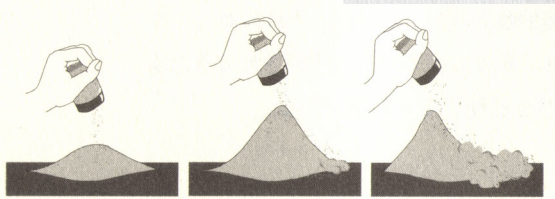
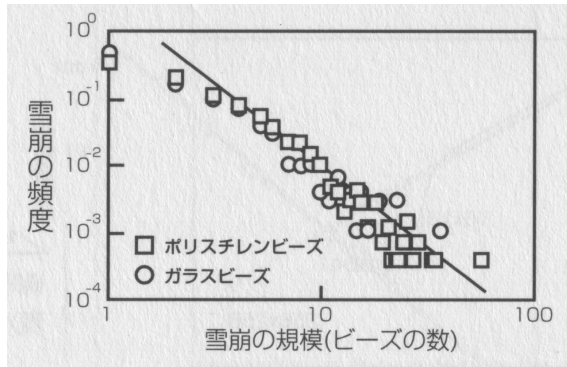
井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## ベキ乗分布:価格の変動



井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## べき乗分布: 砂山と雪崩



井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## べき乗分布: 砂山のシミュレーション

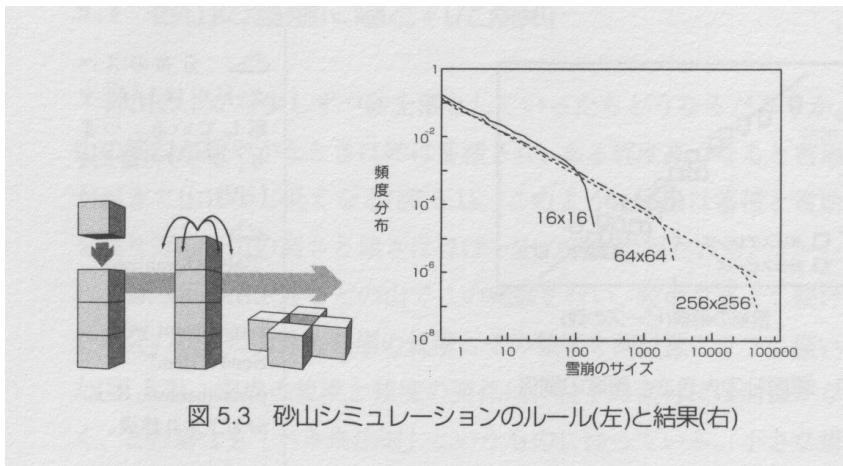
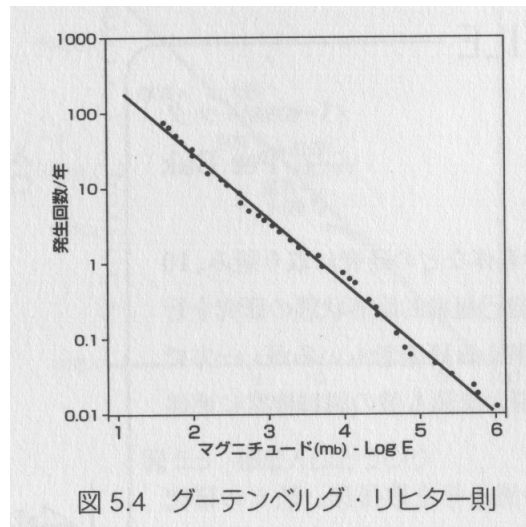


図 5.3 砂山シミュレーションのルール(左)と結果(右)

井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## ベキ乗分布:地震



井庭崇, 福原義久, 『複雑系入門』. NTT出版, 1998

## 金融機関の資金取引ネットワーク

- 稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹
- 「金融機関の資金取引ネットワーク」,
- 金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2
- 日本銀行金融市場局, 2003年
- <http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>

## 金融機関の資金取引ネットワーク

- 資金取引がつくる金融ネットワークの構造
- 日銀ネット: 2001年6月～2002年12月
  
- 金融ネットワークの構造分析の意義
  - ひとつの金融機関の資金取引機能が失われた場合、金融機関の連鎖的な機能停止を引き起こす可能性を事前に知る

稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」,  
金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 金融機関の資金取引ネットワーク

- 2001年6月
- 同一金融機関の支店間の決済を含む場合
  - 1度でも決済を行ったのは546機関
  - 決済の総数は約15万件
  - 決済額は延べ733兆
  - 1件の決済の最高額は約7620億円、最低額は1円
- 支店間の決済を含まない場合
  - 決済の総数は約14万件
  - 延べ決済額は約710兆円

稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」,  
金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 金融機関の資金取引ネットワーク

- 金融機関の数は546
- これを組み合わせると、148,785のペア
- 一度でも決済があったペアの数は7,351ペア(5%に満たない)

稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」,  
金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 金融機関の資金取引ネットワーク

決済回数が21以上の  
ペアにリンクを張ると...

- ・354の金融機関だけが残る
- ・可能な総ペア数は、62,481
- ・実際にリンクが張られているペアは、1,727(3%未満)

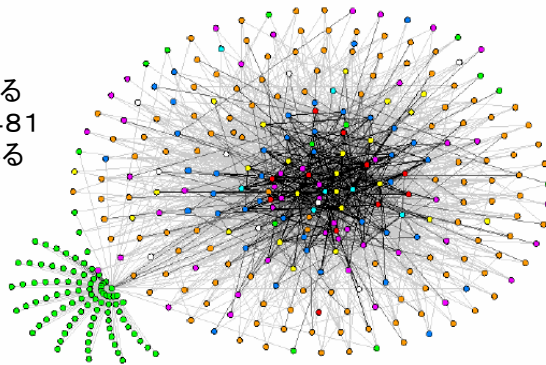
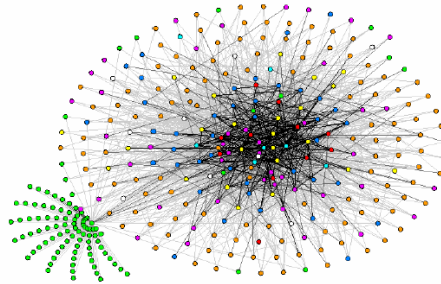


図4：資金取引のネットワーク。線の濃さは決済の頻度。マークの色は金融機関の種類。  
●：都市銀行・長期信用銀行、●：地方銀行、●：信託銀行、●：信用金庫、●：短資会社  
●：証券金融会社、●：外国銀行、●：証券会社、○：その他

稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」,  
金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 金融機関の資金取引ネットワーク

- 分析の結果わかったこと
  - 中核となる金融機関へのリンクの集中度が高い構造
  - 安定性よりも経済効率性を重視した構造



稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」,  
金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 金融機関の資金取引ネットワーク

- 破壊に対する安定性 (Barabasi et al.)
  - 災害 (failure)
    - ランダムに選んだノードを破壊
  - 攻撃 (attack)
    - リンク数の多いノードから順に破壊

稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」,  
金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 金融機関の資金取引ネットワーク

### ■ ランダムネットワークの場合

- 災害(ランダムに選んだノードを破壊)と攻撃(リンク数の多いノードから順に破壊)の場合のネットワーク構造の影響に大きな差が見られない。

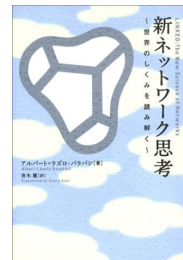
### ■ スケールフリーネットワークの場合

- 災害(ランダムに選んだノードを破壊)の場合には影響は比較的小さい。
- 攻撃(リンク数の多いノードから順に破壊)の場合には、ネットワーク構造に非常に大きな影響を与える。

稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」, 金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003年  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)

## 今日の話題に関連する文献

- アルバート・ラズロ・バラバシ, 『新ネットワーク思考: 世界のしくみを読み解く』, NHK出版, 2002
- ダンカン・ワッツ, 『スモールワールド・ネットワーク: 世界を知るための新科学的思考法』, 阪急コミュニケーションズ, 2004
- Steven Strogatz, **SYNC: The Emerging Science of Spontaneous Order**, Hyperion Books, 2003
- 稲岡創, 二宮拓人, 谷口健, 清水季子, 高安秀樹, 「金融機関の資金取引ネットワーク」, 金融市場局ワーキングペーパーシリーズ2003-J-2, 日本銀行金融市場局, 2003  
(<http://www.boj.or.jp/ronbun/03/kwp03j02.htm>)
- 『複雑系入門』(第5章)





## 宿題(授業第10回)内容

- ①教科書『複雑系入門』の第8章、第12章を読んで、次の点についてまとめてください。
  - 複雑適応系とは、どのようなシステムか？
  - 複雑適応系のモデルを用いることで、社会・経済の分析に、どのような新しい可能性をもたらすと考えられるか？
- ②今日の授業で新しくわかったこと、考えたこと、感想。

1月は、複雑適応系に関する「ニューラルネットワーク」と「遺伝的アルゴリズム」に関する内容になります。

## 宿題(授業第10回)形式

- 提出 & 締切: 1月の最初の授業開始時に教室で。
- 形式: A4用紙1枚(両面可)
  - 宿題(第10回)と明記
  - 学部・学年・学籍番号・メールアドレス・名前を明記
- 1月の最初の授業前も、演習用のシミュレーション・プラグインをダウンロードしてもらいます。準備が出来次第、メールします。


## 「モデリング・シミュレーション入門」(井庭)補講情報

ゲストスピーカー講演

「物語としてのソフトウェアと社会システム  
-PICSYとgumonji-」

12月18日(土)2限 Ω22教室

- 鈴木 健 氏 (PICSYプロジェクト)
- 中嶋 謙互 氏 (コミュニティエンジン株式会社代表取締役社長)



明日

2限

授業開始時に出席をとります。遅刻しないように!  
また、講演後、宿題として感想を書いて提出してもらいます。