

マルチエージェント・シミュレーションによる商品市場の分析

井庭 崇

慶應義塾大学総合政策学部

1 はじめに

私たちの生活には、膨大な数の商品が溢れている。しかし、それらのほとんどは消費者の選択・購買による自然淘汰によっていつの間にか消えていく。多くの人に選ばれ、ヒットする商品はごくわずかである。このように、商品の売り上げに著しい偏りが存在することは以前から知られていたが、近年の研究によって、商品の販売量と順位の関係が「べき乗分布」に従っていることが明らかになってきた[1, 2]。

個々人のレベルでは、消費者は自由に商品を購入しているが、市場のレベルでは、商品の販売量と順位の関係がべき乗分布になるという法則性が見出される。この法則性は個々人に還元することができないので、市場における創発的秩序であるといえる[3]。しかし、このような創発的秩序がどのようなメカニズムによって形成されるのかについては、あまりよくわかつていない。そこで本発表では、べき乗分布を生み出すメカニズムを組み込んだ市場モデルの構築に向け、基本モデルを提案する。

2 市場の創発的秩序

あるシステムの構成要素が相互作用をした結果、秩序が形成され、そのシステムに特有の法則性が生まれることがある。このような事態を「創発」(emergence)という。創発は、単にボトムアップ的に秩序が形成されることを意味するのではなく、そのとき出現したものが下位のレベルに還元できない固有の「法則性」をもつ、という点が重要である。社会の場合であれば、個々人の行動の結果、個々人のレベルには還元できない社会レベルの秩序が生まれた場合、それを創発的秩序というのである。

この創発的秩序の具体的なイメージとして、本発表で取り上げるのは、書籍販売市場の売れ行きに関する法則性である。現在、日本で流通している書籍は12億冊以上といわれ、そのなかから消費者は商品を選択し、購入している。全国の書店の販売時点情報管理(POS)システムの販売データを解析した結果、書籍の銘柄別の販売量と順位の関係が「べき乗分布」

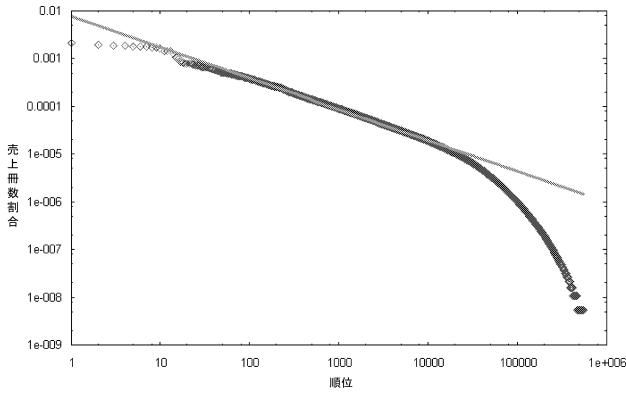


図 1: 商品販売市場における販売冊数-順位のべき乗分布 (2005 年度)

(power law distribution) という分布に従っていることがわかった [1, 2]。それぞれの書籍の販売冊数を縦軸にとり、それを売れているものから順番に横軸に並べてグラフ化すると、図 1 のようなグラフになる。両対数グラフにおいて直線的になっているので、書籍の販売冊数と順位との関係がべき乗分布になっていることを示している。この分布は、月間でみても年間でみても成り立っている。

このように個々人のレベルでみると自由に商品を購入しているのであるが、社会（市場）のレベルでみると、実は結果としてべき乗分布という法則性に従っているのである（図 2）。この法則性は個々人には還元することができないので、社会レベルの創発的秩序だといえる。現在日本で発行される新刊タイトル数は年間 7 万 7 千点にのぼり、書店の棚に並んでいる商品の種類は日々入れ替わっている。それにもかかわらず、べき乗分布という社会レベルの法則性は変わらず成り立っている。

実はこの市場の法則性のほかにも、都市、社会ネットワーク、価格変動、所得など様々な領域で、このべき乗分布が見出されている。都市人口の規模と順位は、べき乗分布になることが知られている [4]。このことは、1890 年以降のアメリカの都市についても [5]、日本の都市についても当てはまる [6]。また、社会ネットワークにおけるノードの次数（そのノードがもつリンク数）と順位の関係にも、べき乗分布があることが近年明らかになっていている [7][8]。そのほか、所得分布の一部がべき乗になることが知られており、「パレートの法則」と呼ばれている [9, 10, 11]。企業の所得分布もべき乗分布に従うことがわかっており、業種ごとの比較研究などもある [12]。さらに、価格変動の規模と頻度の関係をべき乗分布が見出されている [13]。

それでは、このようなべき乗分布はどのようにして生成されるのだろう

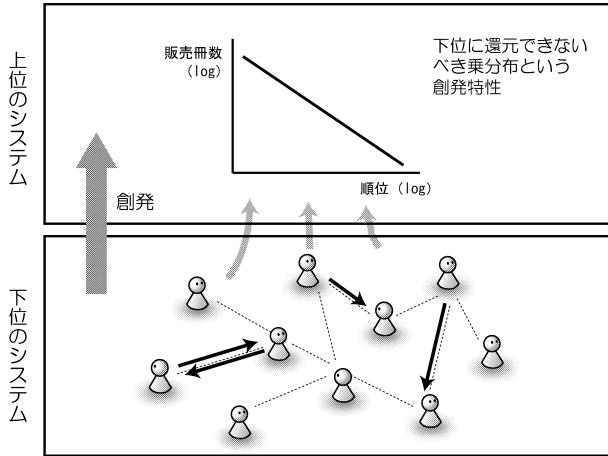


図 2: 創発的秩序としてのべき乗分布

か。それにはおそらく、べき乗分布を生みだすメカニズムのひとつである「自己組織的臨界現象」(self-organized criticality) [14][15] が関係していると思われる。自己組織的臨界現象は、各要素が相互に影響をし合っている相互作用系で起こる [15]。相互作用の結果、正のフィードバックの効果によって、売れるものはますます売れるようになり、ウィナー・テイク・オール市場へ近づくことになると考えられる。

このことを書籍のケースで考えてみると、書籍販売市場における消費者は、店頭での露出、メディアでの広告や評価、知人間の話題に影響をされるということなどが想定される。このことは、書籍の購買選択のきっかけを調べたアンケート調査 [16] などからも妥当であると思われる。このアンケートの結果¹によると、書籍の購買選択は「書店の店頭で見て」(40.7%)、「ベストセラーなどの話題をきっかけに」(26.5%)、「インターネット書店などネット情報を見て」(6.0%)、「新聞の書評を読んで」(28.6%)、「雑誌の書評を読んで」(11.1%)、「新聞や雑誌などの広告を見て」(26.3%)、「本を紹介するテレビ番組を見て」(14.0%)、「周囲の人の話を聞いて」(19.6%)行っているという。

このような相互作用によって、書籍販売市場は臨界状態へ自らを自己組織化させていると考えることができる。このメカニズムの厳密なモデル化については、今後の課題であるが、本発表では、ネットワーク科学で提案されている「べき乗分布」生成のメカニズムを参考に、たたき台となるモデルを提案する。

¹個別訪問面接聴取法による、全国の有権者 3000 人（250 地点、層化二段無作為抽出法）を対象。有効回収数 = 1818 人（回収率 60.6%）[16]。



図 3: 消費者によって選択された商品

3 商品ネットワークモデルの提案

3.1 商品ネットワークとは

消費者は、市場に存在する膨大な数の商品の中から、いくつかの商品を選択している。そのとき、人は思考コストの節約などの理由から、習慣的な行動を取ることが多い[17]。つまり、ある特定のブランドに対して、他に比べてより強い嗜好を持つならば、それを購買し続けるということである[18]。

ここでは、図 3 のように、消費者 1 が多様な選択肢の中から商品 A と商品 B を選択する場合を考えてみよう。この場合、選ばれた商品の側に注目してみると、商品 A と商品 B は「消費者 1 によって選び出されたもの同士である」という関係にある。この点に注目すると、市場に存在するすべての消費者の購買行動の結果を、「消費者によって結びつけられた商品のネットワーク」として可視化することができる(図 4)。

この発想には、2つの利点がある。第1の利点は、商品の売れ行きや市場規模の変化を、商品のネットワークのトポロジーとして観察することができる点である。また、商品ごとの特徴が明らかであれば、それらの商品間の関係性²の把握も容易であろう。第2の利点は、商品市場を捉える際に、ネットワーク科学の知見を利用することができるという点である。べき乗分布とその生成メカニズムの理解が進んでいるネットワーク科学の理論・概念は、市場における秩序の創発の理解に応用することができるだろう。

3.2 本発表で提案する商品ネットワークモデル

本節では、前節で提案した商品のネットワークの発想をもとに、購買行動のモデル化を行う[19]。商品のネットワークは商品と消費者によって構成され、時とともに成長していく。提案モデルでは、少數の商品が市場に

²この場合には、どの商品との商品が一緒に選ばれる傾向があるかを示す。Amazon.co.jp の「この商品を買った人はこんな商品も買っています」という仕組みなどは商品間の関係性を活用した好例であろう。

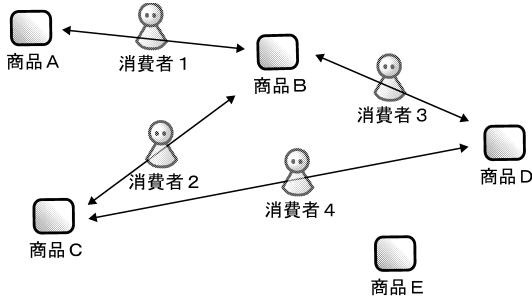


図 4: 商品のネットワーク

存在する状態を初期状態とする。初期状態では、市場に消費者は居らず、その時点で存在する商品はすべて同じ状態である。そして、ステップごとに以下の a、b、c のいずれかの操作が行われるものとする（図 5）。なお、「優先的選択」とは、既にたくさんのリンクを獲得しているノードほど選択される確率が高いということである [20]。また、 $p + q \leq 1$ である。

- a. 確率 p で、 m 人の消費者が新たに市場に加わる。すなわち、 m 人の消費者が新たに市場に参加し、それぞれ優先的選択に従って商品を選択し、購入する。
- b. 確率 q で、 m 人の既存の消費者が商品の選択を変える。すなわち、 m 人の既に市場に参加している消費者が、自身の今まで購入していた商品のうち、1 つの商品をやめ、新たな商品を優先的選択によって選択し、購入する³。
- c. 確率 $(1 - p - q)$ で、新商品が発売される。すなわち 1 つの新商品が発売され、 m 人の消費者が新商品を選択し、購入する。

3.3 提案モデルと一般化 BA モデルの同型性

前述の提案モデルは、消費者による商品の購買行動を、ネットワーク科学の分野において提案された「一般化 BA モデル」[21] の原理を援用して捉えたものである。一般化 BA モデルにおけるノードおよびリンクは、提案モデルの「商品」および「消費者」に対応している⁴。また、提案モデルにおける a、b、c の操作は、一般化 BA モデルにおける「新規リンクの

³これは、好みのブランドのスイッチングにあたる。

⁴厳密にいえば、シミュレーションモデルでは、消費者もエージェントとして存在し、商品との「関係」を持っている。そのため、複数の消費者が同様の商品の組み合わせを選択することもあり得る。

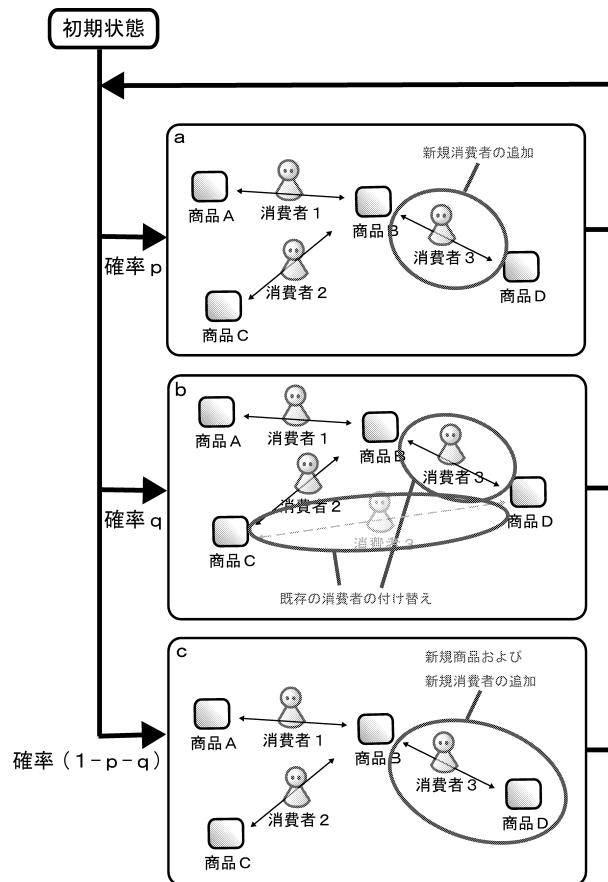


図 5: 提案モデルの概要

追加」「既存リンクのつなぎ替え」「新規ノードの追加」という操作にそれぞれ対応している。

商品市場における購買行動を考える上で一般化 BA モデルを取り上げる理由は、購買行動という対象についての分析の視点を変えることだけが目的ではない。これらの現象には、2つ共通点がある。第1に、商品であれノードであれ、結果として、多くから選ばれるごく一部のものと、あまり選ばれることのないその他のものに分かれるという分布の偏りが生じる。第2に、どちらの場合も、この偏りがべき乗分布という特定の形に落ち着くことがある。この2つの共通点を軸にすることで、一般化 BA モデルを商品の購買行動へ援用することができるのでないか、と私たちは考えたのである。

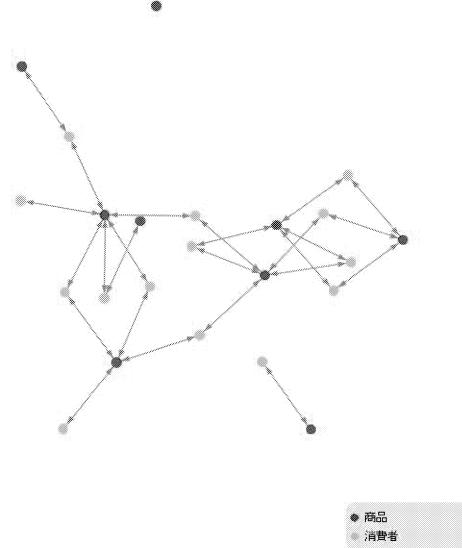


図 6: 商品ネットワークのトポロジー (25 ステップ目)

4 シミュレーション結果

提案モデルをコンピュータ・シミュレーションのモデルとして実装し、シミュレーション実験を行った⁵。ここでは、その結果のうち、いくつかを紹介する。

4.1 ネットワークのトポロジー

まず、各商品の売り上げの時系列に沿った変化を、商品のネットワークを可視化することで確認することにしたい。図 6 および図 7 は、パラメータ $m=1$ 、パラメータ $p=0.8$ 、パラメータ $q=0.0$ のときの商品のネットワークを可視化したものである。初期の段階では、各商品の売れ行きにはわずかな差があるだけである（図 6）。

しかし、消費者や商品の増加による商品のネットワークの成長のなかで、次第に一部の商品に対して消費者の人気が集中していく。その一方で、ごく少数の消費者にしか選択されていない商品や、誰にも選択されずにネットワークから孤立している商品も目立つようになってくる。

500 ステップの時点では、ごく一部の商品への集中傾向は更に加速し、特にネットワークの中央に位置している 3 種類の商品に対する集中が顕著

⁵モデルの実装およびシミュレーション実験は、PlatBox (<http://www.platbox.org>) を用いて行った。結果の詳細については、論文 [22] を参照して頂きたい。

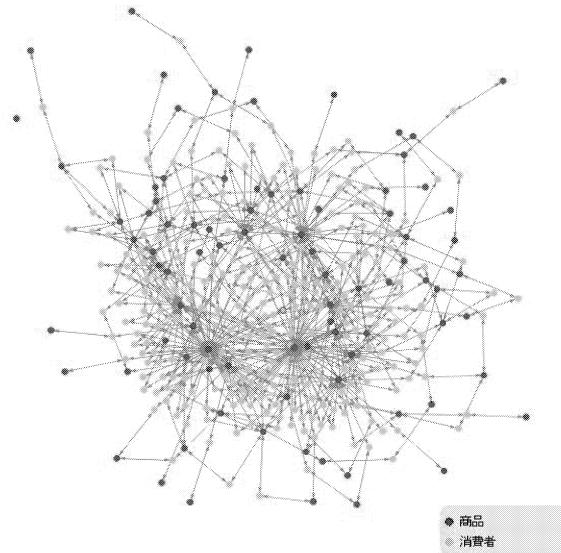


図 7: 商品ネットワークのトポロジー (500 ステップ目)

になっている。また、ネットワークの外側に見られる、消費者にあまり選択されない商品の数もまた確実に増加している（図 7）。つまり、売れる商品と売れない商品の間の格差が顕在化してくるのである。これは、現実の市場の傾向とも一致している。

4.2 販売量と順位の分布

商品の販売量とその順位を両対数グラフ上にプロットし、売り上げと順位の分布がどのようにになっているかを示したものが、図 8 および図 9 である。それぞれ、提案モデルの設定を変えて実行した際の、10000 ステップ時点での各商品の売り上げと順位を両対数グラフ上にプロットしている。これらのグラフはすべて、縦軸が販売量、横軸がその順位である。

消費者が優先的選択と適合するようななかたちで商品選択・購入を行っていると仮定すると、商品の売り上げの分布は、多くの場合べき乗分布、あるいはそれに近い分布になることが読み取れる。ただし、その偏り具合はパラメータ、すなわち市場の状況によって様々であり、市場に存在する商品数が少ない場合には、商品の売り上げの分布はべき乗分布にはならず、商品間の売り上げの差はそれほど大きくならない。

また、図 10 および図 11 は、商品の売り上げと順位の関係を 100 ステップごとにグラフ上にプロットし、その関係が時系列に沿ってどのように変

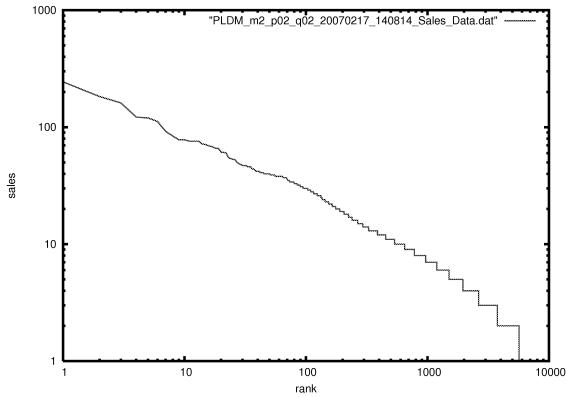


図 8: 販売量と順位の分布 ($m=2$, $p=0.2$, $q=0.2$, 10000 ステップ目)

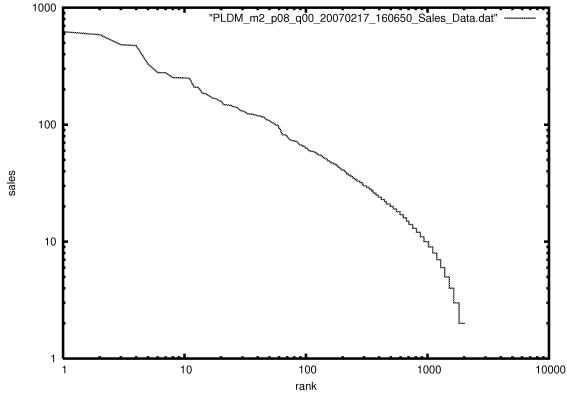


図 9: 販売量と順位の分布 ($m=2$, $p=0.8$, $q=0.0$, 10000 ステップ目)

化しているかを示したものである。これらのグラフから、商品の売り上げと順位の関係は徐々にきれいなべき乗分布に近づいていることがわかる⁶。また、グラフのヘッド（トップの部分）の販売量の増加とテールの部分の広がりから、時間を経るに従って、選ばれるものとあまり選ばれないものの 2 極化が著しくなっていることが読み取れる。

5 おわりに

本発表では、消費者による購買行動に対して「商品のネットワーク」という視点からのアプローチを提案し、その発想にもとづくモデル化とシ

⁶時間経過のなかで、個々の商品の順位自体が変動することはある。

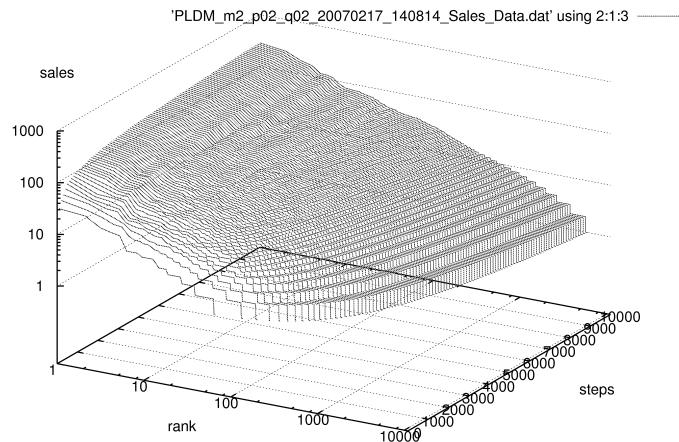


図 10: 販売量と順位の関係の時系列変化 ($m=2$, $p=0.2$, $q=0.2$, 両対数グラフ)

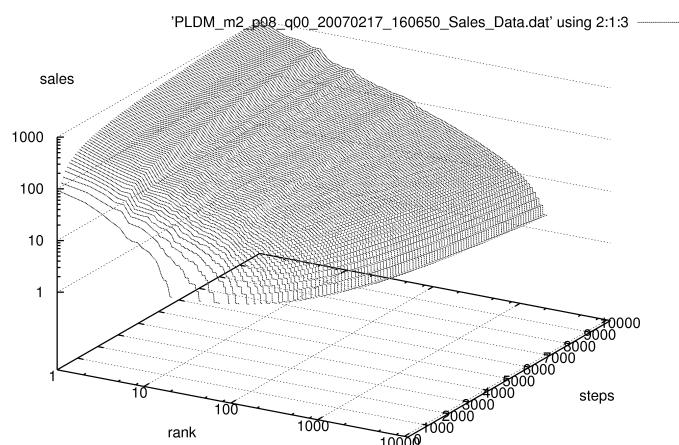


図 11: 販売量と順位の関係の時系列変化 ($m=2$, $p=0.8$, $q=0.0$, 両対数グラフ)

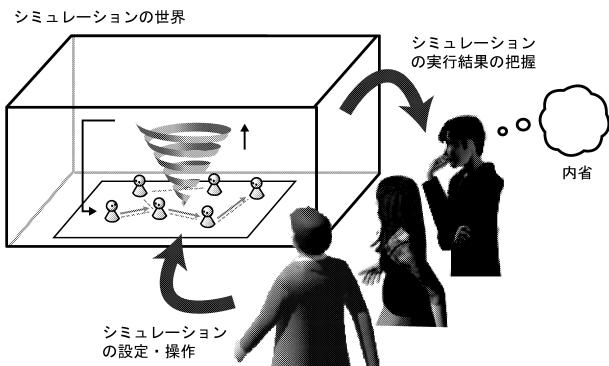


図 12: システム思考における構成的理

ミュレーションを試みた。提案モデル自体には改良の余地があるものの、様々な拡張可能性を持っており、商品の販売量と順位にみられるべき乗分布の発生メカニズムを分析するための基本モデルとして利用できるだろう。

シミュレーションによる構成的理のための支援システムとして、筆者たちは思考の道具箱「PlatBox」を開発・提供している。PlatBox では、たくさんの部品を組み合わせて、コンピュータ上に「箱庭」の社会をつくることができる（図 13）。また、その箱庭社会のシミュレーションを行い、いろいろな観点で分析することもできる（図 14）。PlatBox では、プログラミング言語ではなくモデリング言語を用いてシミュレーションモデルを作成できるので、プログラミングに馴染みのない社会科学者やビジネスマンでも、複雑系の構成的理に取り組むことができるようになっている。

このように、システム思考を支援するための道具として、シミュレーションを用いることができる。なお、ここで紹介した思考の道具箱「PlatBox」は、私たちのプロジェクトのホームページ <http://www.platbox.org/> で公開している。興味がある方はぜひダウンロードして、モデリング言語によるシミュレーションモデル作成を体験してみてほしい。

このような取り組みが、消費行動や市場における秩序形成の研究に際して、何らかの新たな進展に貢献できれば幸いである。

謝辞

本発表の内容は、井庭研究室 市場分析プロジェクトにおけるこれまでの研究成果にもとづいている。伊藤 諭志さん、吉田 真理子さん、深見 嘉明さんを初めとするプロジェクトメンバーに感謝したい。

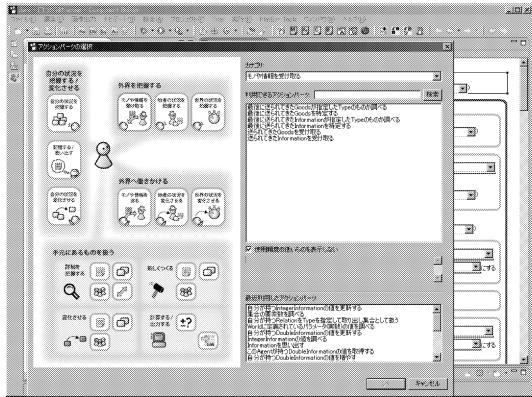


図 13: モデル作成支援ツール : Component Builder

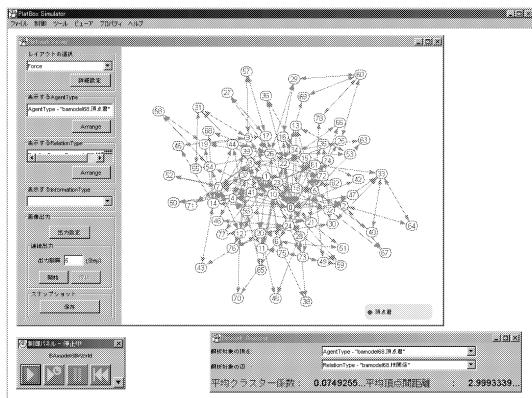


図 14: シミュレーション実行ツール : PlatBox Simulator

参考文献

- [1] 井庭 崇, 深見 嘉明, and 斎藤 優. 書籍販売市場における隠れた法則性. 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, 2007.
- [2] 井庭 崇, 深見 嘉明, 吉田 真理子, 山下 耕平, and 斎藤 優. 書籍販売市場における上位タイトルの売上分析. In 情報処理学会 第 64 回数理モデル化と問題解決研究会, 2007.
- [3] 井庭 崇. 新しいシステム観にもとづく思考と実践. *Mobile Society Review 未来心理*, 009, 2007.
- [4] H. Simon. On a class of skew distribution functions. *Biometrika*, 1995.

- [5] Paul R. Krugman. *The Self-Organizing Economy*. Blackwell Publishers, 1996. ポール・クルーグマン, 『自己組織化の経済学: 経済秩序はいかに創発するか』, 東洋経済新報社, 1997.
- [6] 丸田 一. 都市の規模や勢力の分布に関する考察及びベキ指数を用いた都市圈集積度分析手法の提案. GLOCOM Review 5, 国際大学グローバル・コミュニケーション・センター, Oct. 2003.
- [7] Albert-László Barabási. *LINKED: The New Science of Networks*, Perseus Book Group. Perseus Book Group, 2002. 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』, 青木薰(訳), NHK 出版, 2002.
- [8] Duncan J. Watts. *Six Degrees: The Science of a Connected Age*. W. W. Norton & company, 2003. ダンカン・ワッツ, 『スマートワールド・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.
- [9] V. Pareto. *Cours d'économique politique*. Macmillan, 1897.
- [10] R. Gibrat. *les inegalits économiques*. Sirey, 1931.
- [11] K. Okuyama, M. Takayasu, and H. Takayasu. Zipf's law in income distribution of companies. *Physica A*, 269:125–131, 1999.
- [12] 高安 秀樹 and 高安 美佐子. 経済・情報・生命の臨界ゆらぎ. ダイヤモンド社, 2000.
- [13] 高安 秀樹 and 高安 美佐子. エコノフィジックス: 市場に潜む物理法則. 日本経済新聞社, 2001.
- [14] Per Bak. *how nature works*. Springer-Verlag, 1996.
- [15] Per Bak and Kan Chen. Self-organized criticality. *Scientific American*, 264:46–53, 1991. Per Bak, Kan Chen, 「大地震や経済恐慌を説明する自己組織的臨界状態理論」, 山口昌哉, 木阪正史(訳), 『別冊日経サイエンス 複雑系がひらく世界』, 合原一幸(編), 日経サイエンス社, 1997.
- [16] 毎日企画サービス. 読書世論調査. 每日新聞社, 2004.
- [17] 塩沢 由典. 複雑さの帰結—複雑系経済学試論. NTT 出版, 1997.
- [18] 小野崎 保 and 柳田 達雄. 見えざる手による独占・寡占の創発. In 複雑系社会理論の新地平. 専修大学出版局, 2003.

- [19] 伊藤 諭志 and 井庭 崇. 商品ネットワークの成長モデル：市場の秩序形成の探究に向けて. In 情報処理学会 第 64 回 数理モデル化と問題解決研究会, 2007.
- [20] 増田 直紀 and 今野 紀雄. 「複雑ネットワーク」とは何か—複雑な関係を読み解く新しいアプローチ. 講談社, 2006.
- [21] Albert-László Barabási and Réka Albert. Topology of evolving networks: Local events and universality. *Physical Review Letters*, 85, 2000.
- [22] 伊藤 諭志. 商品市場におけるべき乗分布の発生メカニズムを探る－ネットワーク科学の知見とその応用－. 慶應義塾大学 卒業制作論文, 2007.