

《研究展望》

経済物理学と経済学の革新

有 賀 裕 二*

ABSTRACT The modern society now can be pertinently called “the Winner-Take-All Society” as R. Frank & P. Cook demonstrated, when they have clearly observed the amplifying inequalities of income and wealth among individuals as underlying the “fractal” property, with a result of socially enormous waste. Econophysicists scientifically specified the similar tendency found in the financial sphere by the analysis of scaling laws and fluctuations of critical phenomena. On the other hand, B. Arthur, the Santa Fe economist, who successfully generalized the Polya urn process, skillfully captured the fundamental effects of reinforcement mechanism and path dependence in the increasing return features of our industry field. Either econophysics or the Santa Fe economics have been successful to explore some precise mechanisms in different spheres to move to the winner-take-all property just when they left from microscopic microeconomics or microscopic determinism. Thus they both preferred stochastic characterization to some deterministic views.

1. 経済学の進化と学融合

経済物理に登場する経済学と物理学の象徴的な関係は、2000年秋に公刊されたマンテーニャ *Mantegna, R. N.* とスタンレー *Stanley, H. E.* による世界初の『経済物理学入門』に書いてある通り、経済学者「パレートは所得の分布がベキ乗分布則であるということが普遍的であることを発見し、マンデルブローはこのベキ乗分布則を経済、物理の分野で応用した」¹⁾ということであろう。

1.1 経済学の歴史と数理科学

実は、これまでの主流派経済学は1890年代から1930年代にかけて異分野の研究者の流入によって急成長を遂げたものである。それまでは経済学といえば principles of political economy であった。economy は「領主の家政」の意味があり、それが political になるには課税の原理が必要であることから、古典派の経済理論は economics と呼ばれなかった。近代経済学は1870年代の「限界革命」で古典派経済学の労働価値論にとって替わる価格理論を相次いで確立したが、マーシャル *Marshall, A.* が英国ケンブリッジ大学に経済学の学士号を制定し「経済学」を制度として独立させたのは1903年のことである¹⁾。「マーシャルの経済学」では1890年

には principles of “economics” が使用され、いわゆる新古典派経済学 neoclassical economics が成立した。しかし、20世紀の前半では「経済学原理」を古典派の旧名を用いることが多かったし、実際、ヨーロッパ大陸では different schools が競合し合っていた。もちろん、ドイツの経済学は今なお Volkswirtschaftslehre (国民の経済原理) の名称を残している²⁾。われわれが知っている economics という呼び方は北米の経済学の興隆を起源としており、それほど古いことではないのである。パレート *Pareto, V.* とエッジワース *Edgeworth, F. Y.* が「無差別曲線」など「ミクロ経済学」価格理論のほとんどのツールを作ったが、パレートはローザンヌ、エッジワースはオックスフォードの political economy の教授であった。

1920年代に入り、ウィーンでは哲学者シュリック *Schlick, M.* と数学者ハーン *Hahn, H.* が Vienna circle of logical-empiricist philosopher circle を主宰した²⁾。いわ

¹⁾ マーシャルは1879年にすでに *The Economics of Industry* という著書を著しているが、マーシャルの大学での地位は professor of political economy at the University of Cambridge であった。彼は名実ともに the founder of the Cambridge School of Economics であるが、ケンブリッジで Tripos in Economics and Politics (優等卒業試験) が制定されたのは1903年のことである。これが世界はじめての「経済学士号」と考えられている。

²⁾ ドイツの大学で経済学部は Fachbereich Wirtschaftswissenschaften (経済科学) であるが、講義で Mikroökonomie, Makroökonomie は Volkswirtschaftslehre に属する。

Econophysics in view of economics. By Yuji Aruka (Faculty of Commerce, Chuo University).

*中央大学商学部

ゆるウィーン学団である。こうして自然科学と社会科学の学融合が企画され、異分野の科学者たちが自由に経済モデルを創作することができた。ここにはかのゲーテル Gödel, K. やワルト Wald, A. が集った。数学者メンガー Menger, K. (「限界革命」の経済学者 Menger, C. の息子) によりこれらの成果は *Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums*, Viena, 1931-37 として公刊された。「価格の非負性」も「需要関数の連続性」も厳密な証明はみな数学者、物理学者による貢献である。経済学への貢献で特筆すべきはやはり統計力学のワルトと世紀の天才数学者フォンノイマン von Neumann, J. である³⁾。ワルトは「需要の法則」を科学的に考察し、一方、フォンノイマンは「斉一成長経済モデル」と「ゲーム理論」で経済学に二度に貢献するのである。この時代、統計学や数学のジャーナルでも「経済モデル」が議論され、それがのちの economics の古典となったのである。分野の形式的区分を超えて自由なモデルビルディングを競い合う「学融合的な研究」(transdisciplinary approach) はすでにこの時代の経済学に見出されるのである。なお、学融合は東京大学新領域創成研究科が創作したのキーワードの一つである。

1.2 複雑系科学と進化経済学

さて、1980年代に立ち返ってみると、これと同じことが起きはじめている。グリック著『カオス』⁴⁾やワルドロップ著『複雑系』⁵⁾などの啓蒙書が著わされ「20世紀末の科学革命」は世界中に知れ渡った。実際、カオスやフラクタルの経済モデルが盛んに創作され、さらに1987年のサンタフェ研究所主催による経済学者と物理学者の共同会議が開催された。複雑系経済学の創始者の一人となったアーサー Arthur, B. はこの会議で彼が開発してきたモデルが「物性物理」と同じアイデアであることを知るのである⁶⁾。ここに主流の新古典派的市場モデルは強力な対抗勢力に直面することになる。また、1990年代末にはスタンレー Stanley, H. E., 高安秀樹らが「経済物理」を金融工学に対抗的に形成する⁷⁾。1998年、総合研究大学院でも「新しい分野の開拓、経済学」というプロジェクトが発足し、経済学を経験科学として確定しようとする動きがいつそう明瞭になっている。この流れこそ本稿の課題である「経済学と物理学」の見直しを迫る動きとなっている。

この科学の進化の流れと同時期に、経済学の側からも異変が生じた。進化論は欧米の経済学文献では1940年代には完全に死滅し、1982年まで「進化」は米国でほとんど顧みられなかった⁸⁾。進化という用語が再び経済学に返り咲いたのは、1982年のネルソン・ウィン

ター著『経済変化の進化的理論』⁹⁾の貢献による。この著書は経済過程を進化過程とみなし現実の経済過程を経験的、制度的に分析した。ネルソン Nelson, R. とウィンター Winter, S. の大著の到来はただちに米国やEUの経済学界に「進化経済学会」の設立を促し、1997年3月、日本にも進化経済学会 JAFEE (Japan Association for Evolutionary Economics; 金融工学会とは異なる)^{10,11)}が設立された。進化経済学会は塩沢由典の複雑系科学^{12,13)}の影響により、数学者、物理学者、工学者、生物学者などの学融合的な交流の場の形成に努めてきた¹⁴⁾。

進化経済学の着実な流れはたしかに経済学側がある種の変化を余儀なくされている事情を反映している。経済学は今、科学哲学的方法論の観点のほかに、理論と検証という経験科学として経済学の在り方の反省を必要としている。本稿では、「経済物理学」について経済理論の側から接近する。まず、経済理論の方法について1990年代に生じた「内生的な反省」を述べ、この内生的反省が、実は微視的方法論と巨視的方法論という物理の根本的問題に関わっていることを明らかにしたい。

1.3 新しい方法論の誕生と経済学の現状

従来の合理的経済人 *homo economicus* 仮説にもとづく体系は *positive theory* と *normative theory* を有し、経済の *working* は *positive theory* で説明できると考えていた。主流派経済学は20世紀後半、とくに *normative theory* の分野で「民主主義に関するアロー Arrow, K. J. の不可能性定理」などの輝かしい業績があり、経済学ばかりでなく倫理学などにも大いに社会貢献を果たした¹⁵⁾。ところが、*positive theory* についてみると、20世紀前半にはほぼ完成の域に達した「消費の理論」も「生産の理論」も20世紀後半にはともに実質的な妥当性を失っていった。所得分配の効率性を主張した「分配の限界生産力説」は、もはや結合生産 *joint-production* が常態である化学工場やネットワーク社会では実質的に成立しない。また、他のエージェントから独立な効用関数にもとづく最適消費などは、消費を人為的にコントロールすることが常態である市場社会では実質的に成立しないのである。これによって、レンタルレートや利子といった経済学でもっとも重要な経済概念も危機にさらされたはずであるが、多くの経済学者たちはゲーム論に熱中し基本概念を顧みることなどほとんどなくなってしまった。換言すれば、これまでの概念、つまり「合理的経済人仮説」一本槍では本当に解けない問題が飛躍的に多くなったのである。一部の読者はこのように述べると、評論家の好む「経済学危機論」の

議論と思われるかもしれない。しかし、以下述べることは厳密な経済理論の建設的な提案である。

物理学側から経済物理学 econophysics が登場した 20 世紀末は、経済学の側でも巨視的ミクロ経済理論 macroscopic microeconomics のアイデアが確定した時代である。実際、所得分布など異質なエージェントからなるマクロの構造を経験的に知ることなしにミクロ経済問題が解けないことがわかってきた。このために、異質のエージェントを認識するマクロ動学構造の導入が重要である。マクロ動学の候補はエージェント数のサイズにより異なると考えれば、有力候補は「ボリアの壺過程」や「マスター方程式」のほかに、エージェント数がきわめて大きいなら、「統計力学」である。このように考えると、物理学や確率過程論は経済学の革新の一翼を担う重要な構成要素となることがわかる。そして、経済物理学は経済学には新しい「安定分布」という概念の重要性を提示してくれたのである。

2. 巨視的ミクロ経済理論とヒルデブラントの接近

「需要法則」で「価格が下がれば市場需要が増える」ことを示したい。これを「法則」と呼ぶなら、市場のある人間社会どこでも成立していなければいけない。ただし、ミクロ経済理論から逸脱しないために、需要の議論は金融商品の需要を除いて「消費財需要」に限っておく。証券・商品取引所のトレーダー、ブローカーによる「需要」と効用関数に基づく「消費者需要」は区別しておかねばならないからである。

2.1 ワルトの公理とスルツキー方程式

さて、「ワルトの公理」¹⁶⁾は、価格 p のときの需要 $f(p)$ に関して、

$$p \cdot f(p') \leq p' \cdot f(p') \Rightarrow p' \cdot f(p) \geq p \cdot f(p) \quad (1)$$

を主張する。「需要法則」は

$$(p - p') \cdot f(p) < (p - p') \cdot f(p') \quad (2)$$

なので、ワルトの公理は弱い形の需要法則を示している。これが市場でどうして成り立つのかを示すために、経済学には 100 年前から「パレート-スルツキー方程式」がある。この方程式は、価格 p と所得 x のときの消費者需要 $f^i(p, x)$ の変動を代替効果と所得効果の二つによって説明する。つまり、個人需要関数は「スルツキー方程式」として次のように表現することができる。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial f_j^i(p, x)}{\partial p_k} \right] \\ &= \left[\frac{\partial h_j^i(p, x)}{\partial p_k} \right] - \left[\frac{\partial f_j^i(p, x)}{\partial x} \cdot f_k^i(p, x) \right] \quad (3) \\ & \text{スルツキー代替効果 } s \quad \text{所得効果} \end{aligned}$$

しかし、この一見解析的に見える方程式は、所得効果の方向をもとと解析的に確定できない³⁾。価格体系 p が市場から与えられ、所得 x を有する個人 i の需要関数 $f^i(p, x)$ を「効用最大化問題」

$$f^i(p, x) := \arg \max_{p \cdot z \leq x} u^i(z) \quad (4)$$

の解はスルツキー代替効果しか確定できず、市場における「需要法則」を導くために、かえって個人合理性の仮定をかなり制限しなければならない。つまり、個人の効用関数 $u^i(z)$ が下記の条件を満たさないかぎり、需要法則は成り立たないのである¹⁷⁾。

条件¹⁸⁾ (Mitjuschin and Polterovich (1978))

$$-z \cdot \left[\frac{\partial^2 u_j^i(z)}{\partial z_k \partial z_l} \right] z / \left\{ z \cdot \frac{\partial u_j^i(z)}{\partial z_k} \right\} < 4$$

合理的経済人というミクロのエージェントだけの行動からは決してマクロの市場需要を確定できないのである。

2.2 ヒルデブラントの巨視的ミクロ経済学

この難問を理論的に解きかつ経験的に検証したのは、ヒルデブラント Hildenbrand, W. たちである。ヒルデブラントはプリンストン大学在職中、ゲーム理論家として第一級の評価を得た主流派経済学者であったが、現在では母国のボン大学で教鞭を執り、進化経済学のヴィット Witt, U. (マックスプランク研究所進化経済部門ディレクタ) などとも親交をもっている。まず「個人の需要関数 (個人の選好) の条件」からワルトの公理 [需要法則] を導出できると主張する接近を microscopic microeconomic approach と呼ぶ。この接近には Mitjuschin and Polterovich 条件もしくは個人需要関数一次同次性「 $f^i(p, x) = x^i f^i(p, 1)$ 」などの「非常に制限的な諸仮定」が必要になる。今や「需要法則」を効用関数の枠組とは異なる代替の方法で求めることを試みる。つまり、「代替的な接近は、家計母集団全体について、たとえば、家計の需要関数の分布について仮定を形成すること—これを macroscopic microeconomic approach と呼ぶ—である。家計需要関数が全く同じではないならば、家計母集団の heterogeneity についてある一定の形が必要になる。」¹⁹⁾

³⁾ スルツキー方程式に関して、微小価格変動を推定すれば、

$$\begin{aligned} \Delta p \cdot \Delta f^i &= \Delta p \cdot \left[\frac{\partial f_j^i(p, x^i)}{\partial p_k} \Delta p_k \right] \\ &= \Delta p \cdot \left(\frac{\partial h_j^i(p, x)}{\partial p_k} \Delta p_k \right) - \left(\Delta p \frac{\partial f_j^i(p, x)}{\partial x} \right) (\Delta p f_k^i(p, x)) \end{aligned}$$

を得る。第 2 項は、 $\frac{\partial f_j^i(p, x)}{\partial x}$ は各財 j の限界消費性向、 f_j^i は各財 j の需要。両者が等しくないかぎり、

$$(\Delta p \frac{\partial f_j^i(p, x)}{\partial x}) (\Delta p f_k^i(p, x)) < 0$$

を満たす微小な変動 Δp を常に見出すことができる。第 2 項の係数符号はマイナスであるから、この部分は正と評価される。第 1 項が十分大きな負値でなければ常に $\Delta p \cdot \Delta f^i$ 全体で負値が保証されない。Hildenbrand (1994) p.16.

この代替的接近の論証の見通しをよくするために、リューベル *Lewbel, A.* に従い「一財ケース」で論じておくのがよい²⁰⁾。一財需要のみに限定する場合、「スルツキー方程式」、つまり個人需要曲線の傾きは、

$$\begin{aligned}\partial f / \partial p &= \{\partial f / \partial p + \partial f / \partial x \cdot f\} - \{\partial f / \partial x \cdot f\} \\ &= s - (1/2)(\partial f^2 / \partial x) \quad (7)\end{aligned}$$

と書き換えることができる。個人間の平均化を演算子 E で表せば、

$$\begin{aligned}\partial E(f) / \partial p &= E(s) - (1/2)E(\partial f^2 / \partial x) \\ &= E(s) - (1/2)E[R'(x)] \quad (8)\end{aligned}$$

となる。なお、 $R'(x) = \partial R(x) / \partial x = \partial E(f^2) / \partial x$ より、

$$R(x) = E(f^2) \quad (9)$$

である。

1) $E(s) < 0$ と書ける。

2) $R(x) = E(f^2)$ であるので、 $R(x)$ は所得水準 x の個人に関するあらゆる需要 f の自乗の平均値 $E(f^2)$ である。

$$R(x) = (E(f^2) - \{E(f)\}^2) + \{E(f)\}^2 = E(f^2) \quad (10)$$

分散 f の平方平均

ここで分散はヒルデンプラントの記号で言えば、二次モメント $m^2\{f\}$ である。これより $R(x)$ の値が大きければ、需要が大きいことと同じ所得水準をもつ個人間で「需要の異質性」または「需要の多様性」が大きいことの双方を意味する。よって、 $R(x)$ が需要の spread を測定する。一般に、 p を所得分布の密度関数とすれば、

$$E[R'(x)] = \int R'(x)p(x)dx = \int E(\partial f^2 / \partial x | x)p(x)dx \quad (11)$$

が成り立つ。 $E[R'(x)]$ は需要のランクと所得分布の形状に依存することになり、この研究は経験的分析を必要とする問題である。

まず仮説 2.1 「平均スルツキー代替効果行列 $S(p)$ は半負定値である」を仮定する。仮説 2.1 は先験的に仮定して、当面は検定の対象としない。ヒルデンプラントにより、「所得が増加すると、各所得のバラツキが増加する」ことがちょうど仮説 2.2 「平均所得効果行列を半正にすること」、つまり、ギッフェン効果を除去することを証明かつ検定できる。ヒルデンプラントたちは、EU の家計消費データを用いて実際に家計所得に関して分散 variance が増大すること、また、財支出間で所得が増加するとバラツキ dispersion が拡大することなどを検定した²¹⁾。

2.3 経験科学としての経済学

すでに述べたように、個人主義的効用関数では「スルツキー方程式」の所得効果の非負性を論証できない。そのため、代替効果についてはそのまま容認し、所得効果について、所得分布と個人消費の分散やバラツキの関係から特定化する。ヒルデンプラントが与えた

公理的基礎はまだ静学的であるが、本質的な論点は、「同質的な個人観」を捨てて、「異質性」に着目することである。ヒルデンプラントの公理系の証明は難しくルベグ測度などを利用しているが、きわめて大雑把に言えば、「所得が高い階層の消費は所得の低い階層の消費と較べて分散が大きいだろう」という仮説に基づいている。つまり、彼の理論は「需要の所得弾力性」についての研究になっている。そしてヒルデンプラントの体系で扱える統計諸量は分散、二次モメントで、適用可能な統計分析はノンパラメトリック検定である。まず、仮説検定のために複数の帰無仮説を用意して検証を行い、徹底的に理論と統計資料との整合性を求めていく。彼の仮定のなかにも超越的な仮定があるが、科学哲学の研究対象として豊富な内容が備わっている²²⁾。ヒルデンプラントの公理は経験科学と直截の対照ができるようにはじめから組み立てられており、彼の価格理論は経験的検証をはじめからセットで需要法則を論証しようとしている。この意味で、彼は「経験科学 empirical science」としての経済学を確立した。有賀はヒルデンプラントの需要集計問題研究を日本経済 1979-1998 年の 20 年間のデータへの応用した。『家計調査年報』で所得階級 18 階級分類における集計消費財 10 個のデータを利用している。図 1 は日本における 1998 年の家計所得に関する分散増大、図 2 は任意の 2 財の間のバラツキの拡大の一例である²³⁾。

経済物理のモデルは「フラクタル分布」に代表されるようなマクロ秩序を表す動学的な分布に関連している。本節で紹介したヒルデンプラントの公理系は所得分布を扱うが経済学で論じられる比較静学の域に属する。しかし、その奥にある思想は、個々の分子原子を主体とする決定論ではなくマクロ的振舞いに着目して諸集団の性質や運動を理解しようとする考えである。奇しくも、ヒルデンプラントの需要法則研究の理論的

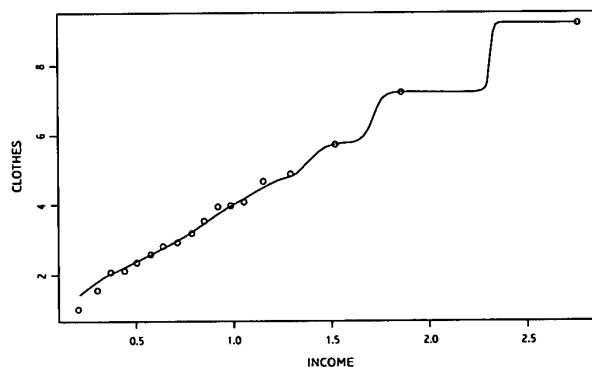
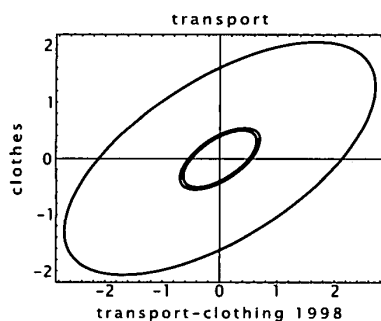


図 1 分散増大の検証



*3 個の楕円で真中の楕円は平均所得サイズに対応している。原点にもっとも近い楕円の所得サイズはその0.5、一番外側はその1.5倍の所得サイズに対応している。

図2 「バラツキ楕円の拡大」の例

出発点は統計力学者ワルト *Wald, A.* が1930年代に定式化した「需要法則」(ワルトの公理)であった。経済物理学がやはり統計力学に負うところが大きいことを考慮すれば、経済物理とヒルデンプラントの研究の間になにか共通項があっても不思議はない。

3. 経済物理からの教訓と市場確率過程論

所得や資産の上位パーセントについてみれば収入に上限はない。そこに属する人々に、得をすると思えば投資を拡大し、損をすると思えば控えるという「自己強化機構」が働けば「フラクタルな性質」が生まれてくるであろう²⁴⁾。そして、実は、フランク *Frank, R.* とクック *Cook, P.* の『ウィナー・テイク・オール—人勝ち社会の到来』で論証されたように、これは現代の経済事情にますます適合しているのである。つまり、証券市場などの金融市場にかぎらず、社会の全分野で「フラクタルな事象」が生じているのが現代社会である。実際、経済学において「地位をめぐる競争と宝くじ購入の研究」はほとんど無関係のようみえるが、「1980年代になってから社会のトップの地位を目指す競争はますます宝くじを買うのに似てきた。このことに気づいたことが[フランクとクックに]『ウィナー・テイク・オール』の執筆を決意させたのである」²⁵⁾。

フラクタルな性質を生み出す「機構」を経済学の側から解明したのがサンタフェ研究所のアーサーであった。アーサーの研究テーマは財市場での「自己強化機構 reinforcement mechanism」であり、「一人勝ち」は「収益増」の観点から研究される。この収益増増で有名なアーサーの「経路依存性」は製品選択や産業立地が過去の履歴によって制限を受けることを明らかにし、

価格理論が microscopic determinism によって決定できないことを示した。彼のモデルは全般にわたりポリアの壺関数という確率過程によって証明されている。これがサンタフェ複雑系経済学として著名となった市場理論である。経済物理の扱う市場は、アーサーとは異なり、金融市場であり、パレート-レヴィ分布過程を扱う。しかし、実は、アーサーも経済物理とともに、経済学の microscopic determinism から離れて、市場を「確率過程」として捉えることによって、成功したのである。本節では、この関連を明らかにしたい。

3.1 経済物理の誕生とその成果

「エッ！経済物理??」というのが「経済物理」を知らない人々の大方の反応である。‘ロングタームヘッジファンドが倒産してからウォールストリートでは「経済物理」が注目され始めた’などと聞けば、「予測が当たるなら太陽の黒点周期でも何でもよい」という物好きな金融証券業者のための新手の手法ではないのかなど勘繰ってしまうからであろう。まして経済学説の歴史や思想史に蘊蓄があればあるほど、物理や数学が19世紀以来経済学に影響を与えてきたのに「何を今更」と思うのも至極当然のことであるように思われる。

経済物理は、新古典派経済学が多くを学んだ古典力学ではなく、統計力学あるいは統計物理学の手法を継承しているということ。そして、たとえば分子数が極端に多くなると、統計力学は物質の個々の性質とは無関係に共通のマクロ的振舞いを実証してきたということ。近年、金融グローバリゼーション下で経済量は「天文学的数量」に達し、また経済数量はコンピュータ管理の下、「秒単位」で入手可能になったということ。当然、それは統計力学の科学的対象となったという成り行きがあった。高安によれば、「市場価格が自発的に大きな変動を生み出すという普遍的な現象」を金融工学は「原因を突き詰めることはせずに、基本となる確率過程であるガウス過程を改良する形で、経験的に現実に近い変動を探してきた。」経済物理は価格変動の原因が「ディーラーが市場に追随する傾向」にあることに着目して研究を始めるのである²⁶⁾。

「自己組織臨界現象」はフラクタル性を伴う複雑性的一种である。このフラクタルの例題を利用して、経済例題を利用したのはマンデルブロー *Mandelbrot, B. B.* が最初で、彼は実は株価変動からフラクタルの着想を得た。この意味で、フラクタルと経済例題はもともと不可分であった。フラクタル性は株価変動にかぎらない。企業のサイズ分布の研究などにも適用できる。株価変動のフラクタル分布には、歴史的な時間差異、地

理的差異があるにもかかわらず、共通に現れてくる「数値」（ベキ乗数）がある。企業サイズの分布にも類似の経験則が見出されるのである。

これらの経済のフラクタル分布について、香取の要約²⁷⁾したがい敷衍してみたい。スタンレーの着眼点は「価格変動のフラクタル性（あるいはカオス性）」である。大きな価格変動の分布が正規分布では補足できずパレート-レヴィ Pareto-Lévy 分布 ($\Delta x^{-\alpha}$, $0 < \alpha < 2$) により近似できることが知られているが、さらに裾野の端にあたる大偏差に対しては Δx^{-3} の当てはまりがよい。スタンレーは企業資産成長率の分布の標準偏差が企業資産の値 A ごとに $A^{-0.15}$ とスケールされることを計測した。また、高安たちは、企業の所得分布でジップ則 Zipf law が成り立つことを示した。たとえば日本の 4000 万円以上の所得 I を申告している約 8 万社のデータ (1997 年度) を解析すると累積分布で $\log P(\geq I) \sim I^{-1}$ が成り立つ²⁸⁾。さらに、これらは過去 30 年を通じても成り立つことがわかる²⁹⁾。

このようにベキ乗で表せる状態がなぜフラクタル（自己相似）なのかということは次のようにしてみればよい。 $\alpha > 0$ として $f(x) = x^{-\alpha}$ に x/b を代入すれば、

$$f(x/b) = (x/b)^{-\alpha} = (b^{\alpha})(x^{-\alpha}) \quad (12)$$

が成り立ち、スケールが異なっても $x^{-\alpha}$ という x 依存性は不変である。自然界では $\exp(-\beta x)$ といういわゆる指数関数で記述される現象の方が一般的である。しかし、指数関数にはベキ関数のようなスケール変換不変性はない。フラクタル図形とは、その一部分を拡大したり縮小したりしても全体と同じ（相似）であるような図形のことであった。この性質は幾何学的なものであるが、縮小とか拡大とかといったものは要するに物の長さを測るスケールを変えることなので、フラクタル性を解析的に表したのが関数のスケール不変性、すなわち、ベキ乗則ということができる。「ベキ乗則」は、熱平衡系では相転移点（より正確には臨界点。臨界とは二つ以上の相の境界に臨んでいるという意味）でのみ見られる特別な法則性である。このような相転移（臨界）点でのベキ乗の指数の値 α （これは臨界指数と呼ばれる）を正確に計算することは、統計力学の主要な研究課題の一つで、特に「複雑系科学」の重要な研究課題の一つとなっているのである³⁰⁾。

3.2 期待効用理論の困難と市場過程

さて、実は一見関係ないように見えるが、経済学は「スケールの問題」に期待効用理論の出発点のところ遭遇している。経済学の期待効用理論は、ベルヌーイ Bernoulli, D. の「セントペテルスブルグのパラドッ

クス」に遡ることができる。これは「親は一枚のコインを投げ、賭け手は最初に n 回続けて裏が出てから、初めて表が出たとき、 $2n-1$ のコインを獲得する」とき、賭けの数学的期待値が無大となるというパラドックスである。この解決として、経済学がベルヌーイにしたがい選んだのは「限界効用逓減の法則」が働く結果、期待効用が有限値になるという仮説であった。つまり、プレイヤーの「効用」が獲得する金額が大きくなるにつれて減少するため無限回賭けに挑戦することはないと考えるのである。換言すれば、「賭け金」はプレイヤーの「危険にたいする態度」によって有限になると考える。ところが、経済物理学ではそうは考えない。マンテーニャとスタンレーは次のように答える。「特徴的なスケールが存在しないにもかかわらず、二人はそれを決めようとしている。」³¹⁾

経済物理では、確率過程が「安定」であることを次の安定分布の考え方で定義する。独立同分布の確率変数 x_i の和を

$$S_n \equiv x_1 + x_2 + \cdots + x_n \quad (13)$$

とする。 x_i の密度関数 $P(x_i)$ のたたみ込み積を行っても密度関数 $P(S_n)$ が $P(x_i)$ と同じ形状であるとき、その分布は「安定分布」であると言われる。レヴィ-ヒンチン Lévy-Khintchine は、安定分布の特性関数が一般に $\alpha \neq 1$ ($0 < \alpha \leq 2$) のとき、

$$\ln \psi(q) = i\mu q - \gamma |q|^{\alpha} [1 - i\beta(q/|q|) \tan(0.5\pi\alpha)] \quad (14a)$$

$\alpha = 1$ のとき、

$$\ln \psi(q) = i\mu q - \gamma |q| [1 + i\beta(q/|q|)(2/\pi) \ln |q|] \quad (14b)$$

であることを明らかにしている。ここで、 α , γ を「スケール因子」と呼ぶ。正規分布、ローレンツ分布などはその代表例であるが、すでに述べたレヴィ分布も安定である。ところが、レヴィ分布のような非正規安定過程では、スケールを表す分散が発散してしまうために、この過程を「特徴づけるスケールを持ち得ない」のである。つまり、このような場合、「ベキ乗分布法則」には、特徴的スケールが欠けているために、直観的に理解できないことになり、「Lévy 以前では発散する期待値を持つ確率変数」はパラドックスそのものと考えざるをえなかったのである。しかし、今では安定分布の概念は「開かれた系」にも適用可能であり、ベキ乗分布則の相関関数は無限系の臨界状態で使用することができる³²⁾。

経済学では一般に効用関数を用いて解を確定するのが流儀である。今の脈絡では効用関数は「期待効用関数」である。期待効用関数は 20 世紀にプリンストンのフォノイマン-モルゲンシュテルン von Neumann-

Morgenstern とオックスフォードのマーシャク Marshak, J. によって公理系が確立されたが、その直後に「アレ Allais, M. のパラドックス」など「期待効用理論」が「実際の決定」に一貫して適用できないことが示された。ケインズ Keynes, J. M. は、まだ期待効用関数が確立されていなかった時代、数学的期待値の議論について次のような見解をもっていた³³⁾。

「こうした学説には、推論のウェイト、すなわち確率の前提にある the amount of evidence を無視していること、ならびに危険の要素を無視する欠陥がある。」³⁴⁾

この種の「危険の要素」の無視は、1980 年ごろ、経済学者たちがようやく認識したことである。実際、平均的人間は、「絶対確実に手に入る 100 万円を 10 パーセント失う可能性」は「20 パーセントしか確実性のない 100 万円を 10 パーセント失う可能性」を回避しようとする傾向があるのだが、期待効用理論はこの種のリスクを想定していないのであった。心理学者であったツヴァスキー Tversky, D. とカーネマン Kahneman, A.³⁵⁾ は「確実性効果 certainty effect」の導入によって、アレのパラドックスは回復させたが、確実性効果によれば、人は、通常、リスクと利得のトレードオフ、つまり、リスクを犠牲にして利得を増大させるか、利得を犠牲にしてリスクを選好するということになる³⁶⁾。こうした考慮は、期待効用理論のほかに「経験的知識にもとづいた調査」を必要とし、その後、「実験経済学」の重要性を喚起したが、これは方法論的個人主義の観点からの改訂にすぎない。個人主義的ミクロ的合理性に留まるかぎり、自分以外の残りの世界 judgment of the rest of the world をどう判断するかは、「共有知識合理性 common knowledge rationality」を仮定するなど先験的な仮定を導入しないかぎり、個人行動の実験や調査もデザインすることができない³⁷⁾。

ところが、経済の「金融」市場問題は「ミクロ個人主義的な危険の認識」だけで解けない。なぜなら、ケインズがよく認識していたように、プロの投資家たちによる行動とは、群集に先んじて群集がいかに行動するかをいかにうまく推測して、「短期に」実際の価値の基礎がどう変化するかを予測することにあるからである³⁸⁾。つまり、経済物理の着眼どおり、ディーラーは「市場価格の変化に追随する傾向」にあるのである。このような投資のプロによる「短期の推測」はマクロ的秩序あるいは群集心理を知ることなしにはありえない。しかしまた、個人にとっては、マクロ秩序を知ることが正確な予測をすることになるとはかぎらない。実際、七條達弘³⁹⁾は、バブル研究のシミュレーション

により、人の行動を模倣する人の増加がバブルを増幅させるばかりでなく、模倣行動を予想した行動もまたバブルを増幅させることを例証している。模倣は自己強化機構を通じてバブルを増幅させるとは容易に予想できるが、正しい予想を織り込むこともまた市場のマクロ秩序に影響を与えることになるであろう。いずれにせよ、主流派経済学の構想する方法論的個人主義では、この問題を解くことはできないのである。

このような金融市場過程は、ミクロの行動を追跡する方法論的個人主義より、むしろ「確率過程」と考えてみるのがよい。スタンレーは「価格の変位が大きな裾野をもつ分布に従うこと」を示したが、この「原因は、ディーラーが市場価格の変化に追随する傾向があり、しかもそれが時間とともにゆらぐ効果にある」⁴⁰⁾ことがわかる。これは価格変動から価格スケール、時間スケール、そして時間依存性ボラティリティによって検証することができる。実際、価格変動の標準偏差は時間に強力に依存しており、価格変動には「時間依存性ボラティリティ」が発生する。そして、経済物理の成功は、金融市場の価格変動を予測する理論枠組みとして、極限定理をもつ非正規安定分布が有用であることを示したことに依るのである。とくにヒンチン Khintchine, A. の極限定理により、価格変動の確率分布がうまく定義でき、金融市場では長い時間スケールで徐々に無限分解可能過程に収束していくことが示される。これはもちろん短い時間スケールに関して成り立たない。

3.3 サンタフェの市場過程とボリアの壺過程

以上の成果だけでは、金融市場の予測問題を解いたことにはならない。価格「変動の先読みが高い精度でできるような手法が開発された」と仮定したとき、同じ手法をディーラーが用いるようになると、どのようなことが予想されるか⁴¹⁾を完全に解いていないからである。しかし、経済物理の利点は、金融市場をまず方法論的個人主義から離れて確率過程として考察した方が、より現実に近い解を求めることができるという点であろう。実は、この視点は、サンタフェ研究所のアーサーが重視した視点と同一なのである。アーサーが扱った市場は金融ではなく通常の商品市場である。現代の商品市場過程をやはり「確率過程」とみなしたのである。経済物理がスケールと時間ボラティリティに注目しレヴィ分布過程に着目したのにたいして、アーサーが注目したのは、「収益逡増」と「経路依存性」であり、これを解くのに用いた確率過程は「ボリアの壺過程」であった。

アーサーによれば、「現実の世界では、いくつかの似たようなサイズの企業が同時に市場に参入しても、予期せぬ注文、買手とうまく出会うこと、経営上の酔狂などの思いもかけない小さな事象が、どの企業がうまく販売で成功し、その後ずっと市場支配するかの決定を助長しているのである。経済活動は個々の取引ごとに数量化され、それらはきわめて小さいために観察することができない。これらの小さな‘確率’事象が累積されると、究極的な結果を決めるような正のフィードバックにより拡大されることがある。これらの示唆するところは、収益増が支配する状況は静的決定論的問題としてではなくランダムな事象、それらに付随する正のフィードバック、非線形性に基づく動的過程としてモデル化されるべきである。」⁴²⁾

正のフィードバックは「自己強化機構」を意味する。有利になったものはいっそう強化されるのである。「この戦略を用いれば、収益増市場は理論モデルとして再現し、それと同じ過程が繰り返し展開する様子を調べることができるであろう。……しかし、それを作動させるためには、その当時には存在していなかった非線形確率過程の理論が必要であった。」⁴³⁾そしてこの理論こそ、1931年に数学者であるポリャ *Polya*, G. が解いた「ポリャの壺過程 *Polya urn process*」⁴⁴⁾であり、1983年にアーサーが二人の[旧]ソビエト連邦の数学者（グルシュコフサイバネティクス研究所）とともに一般化したものである⁴⁵⁾。

こうして、アーサーは収益増問題の確率過程を次の枠組みに求めるのである。「つぎのような定義域を描いて考えてみるとわかる。ボールが一時点に一つ追加される定義域をつくる。ボールは白、赤、緑、青のようないくつかの色から成る。ボールの色はつぎの追加が行われるとき未知であるが、ある与えられた色の確率は定義域にある色の現行の比率に依存する。与えられた色のボールの個数の比率が増加することにより同じ色のボールをもう一つ追加する確率が上昇する。この系は正のフィードバックをもつ。このことが論証できる。問題はつぎのようになる。現行の比率を確率に置き換えられるならば、定義域上の各色の比率は、ボールが数多く追加されたとき、どうなるであろうか。……ボールが追加され続ければ、各色の比率は確率関数の‘不動点’、つまり、各色を追加する確率が定義域上のその色の比率に等しいような値の集合に落ち着く。収益増はそうした不動点集合が複数あることを許す。」⁴⁶⁾

4. 経済学の繰り込み、イジングモデル、ポリャの壺

本節では、これまで言及してきた物理や確率過程の方法が、経済例題でさらにどのように利用できるかについて触れてみる。まず、「繰り込みの方法」の価格方程式への適用について触れ、次にイジングモデルの社会ゲームへの適用について触れる。これはいずれもミクロの素過程の相互作用から発生する多体効果の処理の仕方に関係している。最後に、華厳ゲームの「ポリャの壺過程」による定式化を紹介する。

4.1 価格方程式における繰り込みの方法

前節の論点は、市場問題は微視化だけでは解けないがゆえに、確率過程で解こうというものであった。ところで、ウィルソン *Wilson*, K.G. は「微視化と粗視化」という科学認識の本質問題を「繰り込み群」の方法によって解ける可能性を示した。つまり、微視化から粗視化へと至る可能性が示唆された。多くの粒子の協同現象を「多体効果」と呼ぶ。二体の力相互作用だけでは現れてこなかった多体効果は、三体の力相互作用で現れてくる。このように見る領域を拡げていくにつれて多体効果がシステムの振舞いを複雑にする。「そこで、はじめて大雑把に2体力相互作用だけ出を見て、他のものは省き……次には3体力作用の効果も取り込み（繰り込み）、その次は4対力相互作用の効果も……というように順番に多体効果を繰り込み、その繰り込み操作を無限回繰り返すことによって真実に迫ろうという解析法」を「繰り込み群 *renormalization group*」の方法と呼ぶ⁴⁷⁾。

高安はこの「繰り込み群の方法」を価格方程式について適用している⁴⁸⁾。「価格方程式における繰り込みの方法」とは、高安によれば、「スケールを変える変換をしても同じ方程式で現象が記述できると仮定し、スケールを変えるとともに、パラメータがどのように変化するかを、定量的に評価する方法である。」こうして、短い時間スケールの方程式を長時間スケールの価格変動を推定することを提案している。「この種のくり込み変換を繰り返して、時間の刻み幅を非常に大きくした極限のダイナミクスを推定することも可能である。」⁴⁹⁾

4.2 イジングモデルとゲーム戦略の伝播

次にイジングモデルを取り上げたい。物理学のイジングモデルは「磁石のモデル」として有名であるが枠目からなる「格子モデル」である。すでに、複数のエージェント間の相互作用で生じる多体効果を重視した

「社会学のシナジェティックス」の議論があり、社会現象にマスター方程式を適用する試みは1970年代からなされてきた⁵⁰⁾。状態遷移を説明する理論は社会現象にとってきわめて魅力的であるが、移動する例題は空間的広がりを見せるものである。実際、アーサーは次のように指摘した。「経済のエージェントは隣接するエージェントの選択により影響を受けるであろう。Puffert (1988) は、鉄道の軌間の競争を歴史的に吟味したが、鉄道会社は隣接する鉄道が使用している軌間を採用することが得策であることを見出した。空間的機構は物理学のイジングモデルと絡り込み理論 (Holly 1974) や確率理論の投票者モデルとパラレルになっている (Ligetti 1979, Foellmer 1979)。経済学ではまだ空間的な自己強化機構についてはほんのわずかの仕事しかなされていない。」⁵¹⁾

空間的拡大を必要としない初歩的な経済例題には適用することは難しい。セルラーオートマタの理論も盛んに議論されたが、この理論も空間を「移動する」余地が存在していなければならなかった。ランダムウォークや都市・交通モデルなどでは空間移動する余地こそが重要である。しかし、通常、経済のプレイヤーたちは移住すなわち位置を変えることを利益としているわけではないし、そもそもプレイヤーたちの戦略は位置に依存するわけではない。これがまず「格子モデル」を経済例題に利用することの制約であるが、それでもなお新しい応用を考察することができる。

香取真理の指摘によれば、イジングモデルが「森林生態系」のモデルとまったく同一であるばかりでなく、伝染病の伝播の「コンタクトプロセスモデル」とも同じである⁵²⁾。「コンタクトプロセス」である以上、プレイヤー自身の位置は重要である。そこで戦略の伝播を考えてみたい。このとき、プレイヤーたちの配置は所与としても、プレイヤーが n 人いれば 2^n 通りの組み合わせがある。この組み合わせだけ伝播のパターンがあると考えておく。

戦略の伝播の例題として有賀 Arika の「華厳ゲーム」⁵³⁾を利用してみたい。表1をみよ。このゲームは「二人ゲーム」の社会ゲームであるが、囚人ディレンマゲームとは異なり支配戦略などの一意解が存在しない。均衡解は期待効用の観点から無数にある。なぜなら、協力戦略は相手が裏切り戦略によってかならず失点となり、一方、裏切り戦略でも相手が協力戦略を採ってくれるかぎり得点を保証されるからである。もちろん、ともに協力戦略であれば得点、ともに裏切り戦略であれば失点となる。

表1 華厳ゲーム

	プレイヤー B	
プレイヤー A	裏切り戦略	協力戦略
裏切り戦略	(0, 0)	(1, 0)
協力戦略	(0, 1)	(1, 1)

この華厳ゲームはデザインされた時点から人間を被験者とした国際実験を行っており、国内、国際実験でも tit for tat 戦略の傾向が確認されている。つまり、裏切りにたいしてかならず裏切りで応答する確率を研究することができるのである。コンタクトプロセスモデルに基づけば、初期状態が全員協力戦略であるとして、裏切り「臨界感染率」は裏切り「治癒率」によって決まることになるであろう。ただし、協力戦略を正常的とみなし、裏切り戦略に感染したプレイヤーは有限時間でかならず治癒すると考えている。

華厳ゲームでは全員協力の初期状態であるとき、各プレイヤーは裏切りになっても自分の得点には変わらないので、常に初期状態から「ゆらぐ」ことが可能である。しかも、裏切りによる応答も決して単純な応答になるとはかぎらない。一度裏切りに出会ったとしても裏切りに感染するとはかぎらないのである。また、一人が裏切り戦略を用いても周りの三人が裏切り戦略を用いるとはかぎらない。さらに、感染した者は「移住」によって別の箇所に移り、新しいプレイヤーに入れ替わるとする。これは、ゲームのラウンドが入れ替わって、別の対戦相手が登場することと見なすことができる。このようにゲームが進行するとして、臨界感染率 λ がどう推移していくかは、イジングモデルによって予測することができる。香取によれば、理論的には $\lambda=0.25$ 、しかし、多くの計算機シミュレーションでは $\lambda=0.4119$ である⁵⁴⁾。そして $\lambda=0.25$ では感染は「移住の遮蔽効果」によって消滅するが、そうでなければ裏切り感染は消滅しない。シミュレーションの値は、華厳ゲーム実験結果からすると、それほど現実離れした値ではないかもしれない。臨界裏切り回数とは異なるが、裏切り回数の平均値は0.4の周囲にあることが多いからである。

なお、表2に著者がWeb上で実施した「華厳ゲームの国際比較実験」の結果を引用する。プレイヤー数は10人、ゲームは一ラウンド10人の総当りの繰返しである。フランクフルト大学 (Frankfurt am Main,

表2 華厳ゲームの国際比較実験結果

	Frankfurt a/M	Tokyo I	Tokyo II (1)	Tokyo II (2)	Milwaukee I	Milwaukee II
平均利得	0.731	0.709	0.527	0.502	0.509	0.557
平均協力比率	0.738	0.713	0.53	0.503	0.509	0.559

* Tokyo II (1)は最初の10回の平均, Tokyo II (2)は20回の平均値を示す。

Deutschland) 2000年12月12日の実験ではラウンド数は10回, 中央大学 (Tokyo, Japan) 2001年1月24日の実験 [Tokyo I] ではラウンド数, 中央大学 2001年5月2日の実験 [Tokyo II] ではラウンド数20回, マーquette大学 (Milwaukee, USA) 2001年2月16日の実験 [Milwaukee I], 2月23日の実験 [Milwaukee II] はともにラウンド数10回である。

4.3 華厳ゲームとポリアの壺過程

華厳ゲームは「ポリアの壺過程」によっても定式化することも可能である⁵⁶⁾。華厳ゲームの繰返しを行うが, 以下の設定で行う。

仮説4.1 プレイヤー総数を $2N$ とし, 一ラウンドあたり「総当り」で $2N-1$ マッチ行う。

仮説4.2 「各プレイヤーが協力する比率」を「最大可能な得点の比率」と同一視する⁴⁾。

このとき, 各プレイヤーが第一ラウンドで得ることができる最大可能得点は $2N-1$ である。 X_i をプレイヤー i が得る最大可能点の比率とすると, 第 n ラウンドでの X_i は

$$X_i^n = b_i^n / \{(2N-1)n\} \quad (15)$$

である。標本空間として

$$X_i: \Omega \rightarrow [0, 1], \quad (16a)$$

$$\omega \in \Omega \rightarrow X_i(\omega) \in [0, 1] \quad (16b)$$

をとる。よって, 標本 ω に対して確率

$$x = X_i(\omega) \quad (17)$$

を意味する。 ω は実験結果と考えれば, 標本空間 Ω は次の手番を考える心理空間を形成している。確率 x は確率変数 X_i に依存する。 X_i は相互に独立的である, つまり, 心理的に独立的であると仮定する。第 n 期の比率 X_i の確率変数ベクトルは

$$X^n = (X_1^n, X_2^n, \dots, X_{2N}^n) \quad (18)$$

初期の利得分布を

$$b^1 = (b_1^1, b_2^1, \dots, b_{2N}^1) \quad (19)$$

$q_i^n(x)$ をプレイヤー i が協力戦略によって1点獲得する確率として定義する。このとき, q^n は X^n から X^{n+1} に写

像するルールを与える。 X^n が低い値をとって現れるなら, 次期には X^{n+1} は前期の X^n の値より大きくなるかもしれないし, 逆に X^n が高い値をとって現れるなら, X^{n+1} は前より小さい値をとって出現するかもしれない。このようなルールは一般に非線形力学を生み出す。

さらに, β を次のように定義する。

$$\beta_i(X_i)(\omega) \in \{0, 1\}, \quad (20a)$$

$$\beta_i(x): \Omega \rightarrow \{0, 1\} \quad (20b)$$

このとき, $x = X_i^n(\omega)$ であるならば,

$$q_i^n(x) \text{で与えられる確率で, } \beta_i^n(x) = 1 \quad (21a)$$

$$1 - q_i^n(x) \text{で与えられる確率で, } \beta_i^n(x) = 0 \quad (21b)$$

この β を用いれば, プレイヤーが各ラウンドごと (総当り $2N-1$ マッチ) に追加する点数の力学を定義することができる。

$$b_i^{n+1}(x) = b_i^n(x) + (2N-1)\beta_i^{n+1}(x) \quad (22)$$

b_i^{n+1} はプレイヤー i がゲームの繰返しを通じて第 n 期までに得る累積点数を示す。

すでに定義した X_i^n と b_i^n の関係式を利用すれば,

$$X_i^{n+1} = X_i^n + \{1/(n+1)\}(\beta_i^n(x) - X_i^n) \quad (23)$$

を得る。

$$\xi_i^n = \{1/(n+1)\}(\beta_i^n(x) - q_i^n(x)) \quad (24)$$

に注意すれば,

$$X_i^{n+1} = X_i^n + \{1/(n+1)\}(q_i^n(x) - X_i^n) + \xi_i^n(x) \quad (25)$$

であるが,

$$E(\xi_i^n(x)) = 0.5 \{1/(n+1)\}(1 - q_i^n(x)) + 0.5 \{1/(n+1)\}(0 - (1 - q_i^n(x))) = 0 \quad (26)$$

より, ξ_i^n の条件付期待値は0である。ゆえに, 「繰返し華厳ゲーム」の期待運動は

$$E(X_i^{n+1} | X_i^n) = X_i^n + \{1/(n+1)\}(q_i^n(x) - X_i^n) + \xi_i^n(x) \quad (27)$$

で表される。この運動は項 $(q_i^n(x) - X_i^n)$ に依存している。つまり, q の非線形性に決定的に依存しているのである。この過程はマルチンゲールである。こうして, われわれの華厳ゲームがアーサーたちの一般化ポリア壺過程と同値であることがわかった。これにより, われわれの設定では, 華厳ゲームの社会は決して裏切り戦略だけを示す端点0, あるいは協力戦略だけを示す端点1に収束せずに $[0, 1]$ の内点解に収束するのである。

⁴⁾ 得点は裏切りによっても可能なので, 厳密には, 得点比率を協力比率と見なすことはできない。しかし, 実験結果から, 得点比率と協力比率には順位相関が認められる。

以上より、華厳ゲームの確率過程に思い浮かぶイメージは次のようになるかもしれない。プレイヤーは初期においては他のプレイヤーの行動によって戦略決定を動機づけられるが、究極的には他のプレイヤーから独立的に行動できるようになる。

5. 要 約

フランク・クック著『ウィナー・テイク・オール』は、20世紀末の市場経済の所得や資産分布にはあからさまに「フラクタルな性質」が働き、その結果として資源浪費など社会に大きな歪みが生じることを説得的に実証した。この実証分析はちょうど経済物理学によって病因を特定化されるのである。すなわち、スケーリング則と臨界現象（大きなゆらぎ）である。一方、サンタフェ複雑系経済学は、産業に「一人勝ちの企業」が出現する状況を収益増の観点から分析し、それが自己強化機構と経路依存効果によって発生することを看取した。経済物理学もサンタフェ経済学も研究対象は異なるが、ウィナー・テイク・オールに象徴される現代の「共通の性質」について、どちらもミクロ個人主義的方法論から離れて確率過程に新たな特徴づけを見出したのである。

参 考 文 献

- 1) R. N. Mantegna, H. E. Stanley: A Introduction to Econophysics -Correlations and Complexity in Finance, 148pp., Cambridge U. P. (2000) [中嶋眞澄訳: 経済物理学入門ーファイナンスにおける相関と複雑性ー, 221pp., エコノミスト社 (2000)] p.28 (邦訳 35 頁)
- 2) J. Eatwell, J., M. Milgate, P. Newman.(ed.): The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Macmillan and Maruzen (1987), vol.3, 444/445
- 3) 有賀裕二: スラッファ理論と技術振動, 378pp., 多賀出版 (1998)第1章, 第2章
- 4) J. Gleick: Chaos: Making a New Science (1987) [邦訳: 大貫昌子: カオス, 536pp., 新潮社・新潮文庫 (1991)]
- 5) M. M. Waldrop: Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, 380pp., Simon and Schuster, New York (1992) [邦訳: 田中三彦, 遠山峻征: 複雑系, 524pp., 新潮社 (1996)]
- 6) B. Arthur: Increasing Returns and Path Dependence in the Economy, University of Michigan Press, Ann Arbor (1994) [邦訳: 有賀裕二訳: 収益増と経路依存, 多賀出版 (2002 年刊行予定)] Preface, p.xix
- 7) H. Takayasu(ed.): Empirical Science of Financial Fluctuations, 352pp., Springer, Tokyo (2001) [日本経済新聞社主催の国際ワークショップ Empirical Science of Financial Fluctuations(2000 年 11 月 15-17 日)の成果.]
- 8) G. M. Hodgson: How Can Evolutionary Economics Evolve?, in Aruka(ed.): Evolutionary Controversies in Economics, 23/40, Springer, Tokyo (2001)pp.25/27
- 9) Nelson, R., S. Winter: An Evolutionary Theory of Economic Change, 437pp., Belknap Press of Harvard U. P., Cambridge, Mass: (1982)
- 10) 進化経済学会編: 進化経済学とは何か, 181pp., 有斐閣 (1998)
- 11) Y. Aruka(ed.): Evolutionary Controversies: A New Transdisciplinary Approach(as a JAFEE publication), 252pp., Springer, Tokyo (2001)
- 12) 塩沢由典: 複雑さの帰結ー複雑系経済学試論ー, 314pp., NTT 出版
- 13) 塩沢由典: 複雑系経済学入門, 442pp., 生産性出版
- 14) 有賀裕二: 進化経済学と複雑系, 経済論叢 (京都大学経済学会), 164-5, 74/99 (1998)
- 15) 鈴木興太郎, 後藤玲子: アマルティア・セーン経済学と倫理学ー, 344pp., 実教出版 (2001)
- 16) A. Wald: Über die Produktionsgleichungen und der ökonomischen Wertlehre, Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums, Karl Menger (ed.), 7, 1/6 (1934-35)
- 17) W. Hildenbrand: Market Demand, 205pp., Princeton U.P., Princeton (1994) p.18
- 18) L. G. Mitjuschin, W. M. Polterovich: Criteria for monotonicity of demand functions, Ekonomika i Matematicheskie Metody 14, 122/128(in Russian) (1978)
- 19) Hildenbrand (1994), ibid., p.74
- 20) A. Lewbel: An Examination of Werner Hildenbrand's Market Demand, Journal of Economic Literature, 32, 1832/1841 (1994)
- 21) W. Hildenbrand, W., A. Kneip: Family Expenditure Data, Heteroscedasticity and the Law of Demand, Ricerche Economiche, 47, 137/165 (1993); Hildenbrand (1994), ibid.
- 22) L.Roberto: Werner Hildenbrand's Research Program on the 'Law of Market Demand' Reconsidered, mimeo(J.-W. Goethe University, Frankfurt am Main, 2000)
- 23) Y. Aruka: The Law of Consumer Demand in Japan: A Macroscopic Microeconomic View, in H. Takayasu(ed.): Empirical Science of Financial Fluctuations, 294/303, Springer, Tokyo (2001)
- 24) 高安秀樹, 高安美佐子: フラクタルって何だろう, 205pp., ダイヤモンド社 (1988) 90/91 頁
- 25) R. Frank, P. Cook: The Winner-Take-All Society, 272pp., Free Press, Tokyo (1995) [邦訳: 香西泰監訳: ウィナー・テイク・オールー「ひとり勝ち」社会の到来ー, 332pp., 日本経済新聞社 (1998)] p.ix (邦訳 6 頁)
- 26) 高安秀樹, 高安美佐子: エコノフィジックスー市場に潜む物理法則, 203pp., 日本経済新聞社 (2001) 94 頁
- 27) 香取眞理 (中央大学理工学部) セミナー報告要旨「確率モデルと統計物理学」の要約 (有賀裕二の要約をもとに香取眞理校訂), 進化経済学会 News Letter No.9 (2000)
- 28) K.Okuyama, M.Takayasu, H.Takayasu: Zipf's Law in Income Distribution of Companies, Physica A, 269, 125/131 (1999)
- 29) T. Mizuno, M. Katori, H. Takayasu, and M. Takayasu: Statistical Laws in the Income of Japanese Companies, in H. Takayasu(ed.): Empirical Science of Financial Fluctuations, 321/330, Springer, Tokyo (2001)
- 30) H. Takayasu: Econophysics, Empirical Laws, and Application, in Aruka(ed.), Evolutionary Controversies in Economics, 191/

- 200, Springer, Tokyo (2001)
- 31) Mantegna and Stanley (2000), *ibid.*, 25 (邦訳 32 頁)
 - 32) Mantegna and Stanley (2000), *ibid.*, 25/28 (邦訳 32/42 頁)
 - 33) J. M. Keynes: A Treatise on Probability (1929), Collected Writings of John Maynard Keynes, 514pp., Vol.III, Macmillan, London (1971)
 - 34) I. Hishiyama: Keynes' Economic and Philosophical Thoughts, and its Critical Reorientation, mimeo.(Kagoshima International University 2001) p.7
 - 35) D. Tversky, A. Kahneman: The Framing of Decisions and the Psychology of Choice, *Science*, 211, 453/458 (1981)
 - 36) R. Frank: Microeconomics and Behavior, Third Ed., 744pp., McGrawhill, New York (1997) pp.205/208
 - 37) 有賀裕二: ミクロ経済学入門, 431pp., 新世社 (1996) 385 頁
 - 38) Hishiyama (2001), *ibid.*
 - 39) 七條達弘: 模倣学習モデルによるバブル経済の一考察, mimeo.(大阪府立大学 2001)
 - 40) 高安秀樹, 高安美佐子 (2001), 前載書, 95 頁
 - 41) 高安秀樹, 高安美佐子 (2001), 前載書, 95 頁問題 4
 - 42) Arthur (1994), *ibid.*, p.5
 - 43) Arthur (1994), *ibid.*, pp.5/6
 - 44) G. Polya: Sur quelques Points de la Theorie des Probabilites, *Ann. Inst. H. Poincare*, 1, 117/161 (1931).
 - 45) B. Arthur, Y. M. Ermoliev, Y. M. Kaniovski: On Generalized Urn Scheme of the Polya Kind, *Kibernetika* 19, 49/56 (1983) (in Russian); Arthur (1994), *ibid.*, Chapters 3, 10
 - 46) Arthur (1994)p.6
 - 47) 香取眞理: 複雑系を解く確率モデル—こんな秩序が自然を操る—, 217pp., 講談社 Blue Backs: B1193 (1997) 23/24 頁
 - 48) T. Mizuno, H. Takayasu, M. Takayasu: The Mechanism of Double Exponential Growth in Hyper-inflation of Economic Price, *Physica A*, 308, 411/419 (2002)
 - 49) 高安秀樹, 高安美佐子 (2001), 前掲書, 151 頁
 - 50) W. Weidlich, G. Haag: Concepts and Models of a Quantitative Sociology: The Dynamics of Interacting Populations, 217pp., Springer, Berlin (1983) [邦訳: 寺本英, 中島久男, 重定南奈子: 社会学の数学モデル, 231pp., 東海大学出版会 (1986)]
 - 51) Arthur (1994), *ibid.*, p.129
 - 52) 香取 (1997), 前掲書, 第 2, 3 章参照.
 - 53) Y. Aruka: Avatamsaka Game Structure and Experiment on the Web, in Y. Aruka(ed.): Evolutionary Controversies in Economics, 115/132, Springer, Tokyo (2001)
 - 54) 香取 (1997), 前掲書, 114 頁
 - 55) Y. Aruka: Some Statistical Implications of Avatamsaka Game Experiment, in A. Namatame et.al.: Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems, 101/111, IOS Press, Amsterdam (2002)
 - 56) Y. Aruka: Avatamsaka Game Experiment as a Nonlinear Polya Urn Process, in T. Terano et.al.: New Frontiers in Artificial Intelligence, 153/161, Springer, Heidelberg (2001)