

経済学と生物学の境界で：Lotka-Volterra モデルによる ネットワーク競争へのアプローチ

林 敏 彦¹⁾

Between Economics and Biology : A Lotka-Volterra Approach to Network Competition

Toshihiko HAYASHI

ABSTRACT

Economics has benefited from the methodology of natural science. The concept of general equilibrium is nothing but an application of the Newtonian concept of kinetic equilibrium or thermodynamic equilibrium and the Walras Law is the law of conservation implanted in economics. Now, economics is facing a new challenge by the prevalence of "network effect" in market.

The network effect refers to the phenomenon that as the number of subscribers to a system increases, the intrinsic value of the system looks improved in the eye of consumers. Communication services, conspicuous consumption and industry standards are just a few of such examples. With the network effects, market may not be able to select the fittest for the society.

The purpose of this paper is to show that in order to understand the nature of network competition, the model developed in biology since Lotka and Volterra proves to be quite effective. The paper focuses on the competition between an infrastructure-service provider and a parasite service provider who can only deliver services on the competitor's infrastructure. Applying the host-parasite version of the Lotka-Volterra model, the paper delineates the condition that separates the emergence of single survivor equilibrium and coexistence equilibrium in the long run. The paper also discusses the possible effects of policy intervention by the regulator..

要 旨

経済学は物理学、数学、化学などの方法論を借用するなど、これまでも自然科学との交流のもとに発達してきた。たとえば、一般均衡理論における均衡概念はニュートン力学の均衡概念そのものであり、ワルラス法則はエネルギー保存則に他ならない。そして、今また既存の経済学に再考を迫っているネットワーク競争の問題を扱う上で、一つの自然科学分野の方法論が有効と思われる。

経済学が注目するネットワークは、参加者が多いほどネットワークの価値が高まるというネットワーク効果によって特徴づけられる。通信サービス、ファッション性の消費、産業における技術標準、システムの方式などに見られるこの特徴は、伝統的な市場競争の優位性に関する理論を覆す。すなわち、競争市場は必ずしも適者の生存を許さず、競争を制した企業や製品が社会的な優位性を持つとは限らない。

本論文の目的は、こうしたネットワーク競争の分析において、20世紀の初頭以来、種の相互連関と個体数の変化を分析してきた生物学におけるLotka-Volterraモデルが有効であることを示すことである。論文では、自ら設備を設置してその上でサービスを提供する設備事業者と、他者の設備を借用してサービスを提供する接続業者との競争について、宿主と寄生者との関係を分析するLotka-Volterraモデルを援用し、宿主が寄生者を駆逐する長期均衡と、両者が共存する長期均衡とがどのような条件によって分かれるかを明らかにしつつ、政策介入の帰結についても分析する。

¹⁾ 放送大学教授 (「社会と経済」専攻)

I. はじめに

経済学、特に新古典派経済学は、その理論的厳密さと論理体系の優美さから、しばしば社会科学の女王と呼ばれる。しかし、アダム・スミス以来230年の歴史をもつ経済学の理論体系は、ほとんど自然科学からの借り物でできている。これは、既成の自然科学の理論を経済学が借用したというより、経済学の確立期には、物理学や化学や数学も飛躍的發展を遂げつつあり、経済学者と自然科学者との間に、今日よりもはるかに濃密な個人的親交や議論の機会があったことに起因する。

たとえば、今日の新古典派経済学の中核をなす理論はレオン・ワルラスがその体系を作った一般均衡理論である。ワルラスは、市場経済を、それぞれの財ごとに需要量と供給量が一致することを記した財の種類と同数の方程式体系によって記述し、すべての財の市場の需給均衡をもたらし価格体系をその連立方程式体系の解とみなした¹。

このワルラスの一般均衡概念はニュートン力学の平衡概念に酷似している。また、市場経済システムは、不均衡においても、すべての市場の超過需要をその財の価格で加重した総和は恒等的にゼロであることを示す「ワルラス法則」は、閉ざされた熱力学系における「エネルギー保存則」と同値である²。そして、ワルラス体系に意味のある解が存在することは1950年代に証明されたが、解の存在証明のためにはブラウワーの不動点定理と角谷の不動点定理を待たなければならなかった。

その後も経済学は、数学的方法を取り入れて理論を彫託してきた。1960年代の成長理論には常微分方程式やポントリヤーギンの最適制御理論が応用された。統計学や確率理論の影響も大きかった。最近では、進化経済学の名の下に、社会制度やシステムを生物学における種の進化と類似の概念でとらえようとする試みも進められている³。

こうした学問領域の相互連関は興味深いテーマであるが、本稿ではもう少し焦点を絞り、19世紀以来の歴史をもつ生物学の一分野が、ある経済問題の理解に有用であることを示すことによって、経済学が生物学によって裨益する可能性を論じてみたい。その経済問題とは、ネットワークの競争という問題であり、生物学の一分野とは、生物種間の競争を分析するLotka-Volterraモデルである⁴。

II. ネットワーク競争の一形態

経済学がネットワークに関心を寄せるのは、ネットワークの競争には、伝統的な競争市場の結論が妥当しない現象が見られるからである。すなわち、理想的な条件のもとでは、市場競争は効率的な資源配分を実現するという命題は、厚生経済学の第1命題と呼ばれて

いて、市場システムへの信頼性をつなぎとめる重要な意味を持っている。

しかし、ネットワークには加入者の数がネットワークの価値を高めるという「ネットワーク効果」が存在する。そのため、ネットワーク同士の競争では、力学的安定均衡ではなく、一方が他方を完全に駆逐する一人勝ち均衡が出現し、しかもその均衡には「適者生存」の原則が当てはまらない。市場で勝ち残った企業や製品が、必ずしも社会の望むものであるとの保証はないのである。

双方向性を特徴とするネットワークの動学的生態については、Rohlf's (1973) の先駆的論文以降多くの研究が積み重ねられてきた。特に、ネットワーク効果の発現形態としての「経路依存性」や「ロックイン効果」概念は、幅広い範囲の問題に適用され、政策論争や独占禁止法をめぐる法廷論争においても重要な役割を果たしてきた⁵。

しかしながら、ネットワーク効果概念はこれまでのところ経済学におけるライベンスタイン以降のバンドワゴン効果と関連づけて理解されてきた⁶。また、ネットワーク効果が市場機能に及ぼす効果についても、伝統的な経済学の社会的余剰の視点からの分析が中心であった⁷。Rohlf'sのオリジナルなネットワークモデルが、実は1838年⁸以降生物学の分野で発展していたロジスティック成長モデルに他ならないことが明らかにされたのは、ようやく最近のことであった⁹。

われわれが関心を寄せるのは、ある2つの通信ネットワークの競争のダイナミズムである。電話や情報通信の世界では、ある企業が物理的な通信網設備を保有し、他の企業がその設備を借用してサービスを提供する形態が見られる。たとえば、NTT東西会社は、日本全国にわたって市内通信網を所有しているが、長距離通信会社はその市内網に接続することで自らのサービスを顧客に届けることができる。ADSLプロバイダはNTTの銅線網を借用してブロードバンド・サービスを提供し、光インターネット・プロバイダのほとんどは、NTTや電力系の光ファイバ設備を借用してブロードバンド・サービスを提供する。

この形態は通常、サービス事業者が基幹的設備事業者から設備利用権を卸売りしてもらい、それに独自の付加価値をつけた情報通信サービスを提供すると理解される。しかし、見方を変えると、他社の設備の上で自社のサービスを展開する事業者と、設備を提供する事業者との関係は、寄生者と宿主の関係としてとらえることもできる。しかもほとんどの場合、設備を提供する宿主と、設備を借りる寄生者とは同一のサービスを提供する競争相手でもある。

III. モデル¹⁰

記号を次のように定める。

N_i = 設備を有する設備事業者の契約者数

N_2 = 設備事業者の設備を利用してサービスを提供する接続事業者の契約者数

ϵ_1 = 設備事業者契約者の自然成長率

ϵ_2 = 接続事業者契約者の自然消滅率

α_1 = 設備事業者契約者のロジスティック係数

α_2 = 接続事業者顧客のロジスティック係数

β_1 = 接続事業者による設備事業者契約者の被食係数

β_2 = 接続事業者による設備事業者契約者の捕食係数

考察する状況は次のとおりである。この情報通信サービス市場には設備事業者と接続事業者の2者がサービスを提供している。両者が提供するサービスの品質は、利用者の目から見て差別化されていない。設備事業者は設備部門とサービス部門を統合した事業者である。顧客ベースの拡大がそれぞれの契約者成長率に及ぼす減衰効果は、それぞれロジスティック係数 α_1 および α_2 で表されると仮定する¹¹。

接続事業者は設備事業者の設備に依存しなければサービスを提供できない。とくに設備事業者の設備規模がゼロのとき、接続事業者はサービスを提供できないが、このことをモデルでは、接続事業者の自然的成長率は一定のマイナス値($-\epsilon_2$)をとると表現することにする。 ϵ_2 は接続事業者サービスの自然消滅率と呼ぶことにする。

しかし設備事業者の契約者ベース(N_1)が大きければ、接続事業者は設備事業者の顧客を説得して自分の契約者に転換できる可能性が高まる。このことをモデルでは、 N_2 の成長速度は N_1 に比例して高まるという形で表し、その効果を捕食係数 $\beta_2 > 0$ で表すことにする。同様に設備事業者側から見れば、 N_2 に比例して契約者を奪われる可能性が高まるため、 N_1 の成長速度はそれだけ低下する。その効果は被食係数 $\beta_1 > 0$ によって表すことにする¹²。

したがって、接続事業者の契約者成長率は本来マイナスであり、その契約者成長率は契約者ベースが大きいに比例しては上昇することになる。ここでは、暗黙の内に、設備事業者の設備規模は総数 $N_1 + N_2$ だけの契約者の通信需要をまかなうことができるほど十分大きいと仮定している¹³。

以上の仮定を置いて、2つの事業者の契約者数がどのような成長パターンを示すかを定式化したのが次の微分方程式体系である¹⁴。

$$\dot{N}_1 = (\epsilon_1 - \alpha_1 N_1 - \beta_1 N_2) N_1 \quad (1)$$

$$\dot{N}_2 = (-\epsilon_2 + \beta_2 N_1 - \alpha_2 N_2) N_2 \quad (2)$$

この微分方程式体系の解の特徴を分析するために、まず定常解について見てみよう。定常解は次の方程式を満たさなければならない。

$$N_2 = \frac{\epsilon_1 - \alpha_1}{\beta_1} N_1 \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{\epsilon_2 + \beta_2}{\alpha_2} N_1 \quad (4)$$

これらの関係はいずれも線形であるが、両曲線を図示すると、次の2つの場合に分かれる。第1は2曲線が正象限で交わらない場合であり、第2は2曲線が正象限内に交点を持つ場合である。この図に微分方程式にしたがう平面上の点の動きを描くと、図のようなフェイズ・ダイアグラムが得られる。

IV. 接続事業者敗退均衡と共存均衡

図1は $\frac{\epsilon_1}{\alpha_1} < \frac{\epsilon_2}{\beta_2}$ の場合に対応している。(3)式と(4)式は正象限に交点を持たず、この場合唯一の安定的な定常解は $(N_1^*, N_2^*) = (\frac{\epsilon_1}{\alpha_1}, 0)$ である。すなわち、接続事業者の捕食係数が十分小さい場合には、初期値のいかんにかかわらず、長期的には接続事業者が契約者をすべて失い、設備事業者のみが生存する均衡が出現する。この長期均衡を、「接続事業者敗退均衡」と名付けよう。

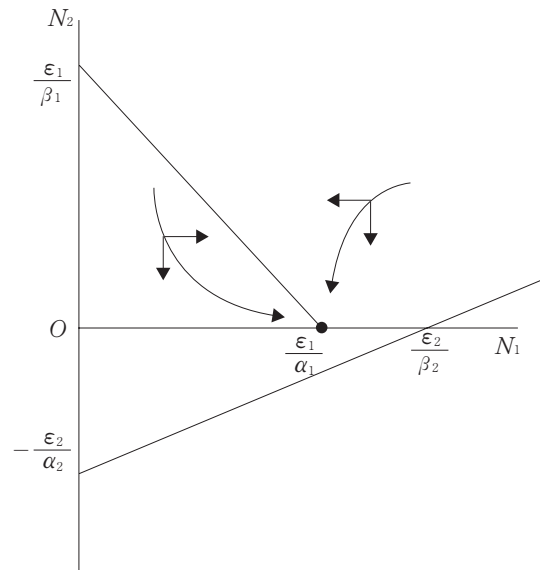


図1 接続事業者敗退均衡

次に、 $\frac{\epsilon_1}{\alpha_1} > \frac{\epsilon_2}{\beta_2}$ のケースについて吟味しよう。この場合、図2に示したように、曲線(3)と(4)とは正象限に交点を持つ。その定常解は(3)と(4)を解いて

$$N_1^* = \frac{\alpha_2 \epsilon_1 + \beta_1 \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2} \quad (5)$$

$$N_2^* = \frac{\epsilon_1 \beta_2 - \alpha_1 \epsilon_2}{\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2} \quad (6)$$

で与えられる。すべてのパラメータが正であるとの仮

定によって、 $\frac{\epsilon_1}{\alpha_1} > \frac{\epsilon_2}{\beta_2}$ は、(6)式より、 $N_2^* > 0$ となる条件に他ならないことが分かる。このケースでは、定常均衡において設備事業者と接続事業者はそれぞれ正の契約者数を確保している。この均衡を「共存均衡」と名づけよう。

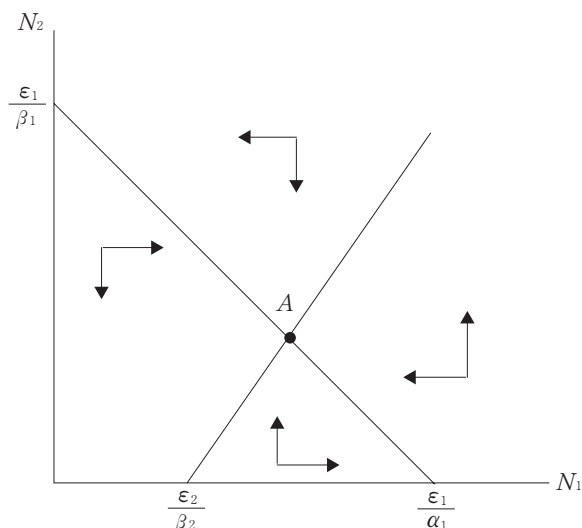


図2 共存均衡

V. 安定性分析

ここで、定常解の安定性を吟味するため、均衡における(1)と(2)の右辺のヤコービ行列を見てみると、それは

$$\begin{bmatrix} -\alpha_1 N_1^* & -\beta_1 N_1^* \\ \beta_2 N_2^* & -\alpha_2 N_2^* \end{bmatrix}$$

となっている。定常解の安定性のためには、ヤコービ行列が負値定符号でなければならないが、そのための条件は、トレースがすべて負値で行列式が正値でなければならない。しかし、トレースは $\alpha_1 > 0$ および $\alpha_2 > 0$ より $N_1^* > 0$ かつ $N_2^* > 0$ ならば負値となり、行列式の値は

$$\det = N_1^* N_2^* (\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2) > 0$$

であるから、先の条件に加えて $\beta_1 > 0$ かつ $\beta_2 > 0$ で正値となる。したがって、(3)式と(4)式が図2のように第1象限で交点を持つ場合には、定常解の安定性は保証されている。そのための条件は(6)式より

$$\frac{\epsilon_1}{\alpha_1} > \frac{\epsilon_2}{\beta_2} \quad (7)$$

で与えられる。

この安定性条件が成立しやすいのは、 β_2 が大きく、 α_1 が小さく、 ϵ_1 が大きく、 ϵ_2 が小さい場合である。これは接続事業者の捕食効果が大きく、市場の成長抑制効果が小さく、設備事業者契約者の自然成長率が大き

く、接続事業者の自然消滅率が小さい場合に実現される。

次に、定常均衡における設備事業者契約数と接続事業者契約数の比率について考察しておこう。両者の比率は、(5)式および(6)式より

$$\frac{N_2^*}{N_1^*} = \frac{\beta_2 \epsilon_1 - \alpha_1 \epsilon_2}{\alpha_2 \epsilon_1 + \beta_1 \epsilon_2} \quad (8)$$

であることが判明する。したがって、容易に見て取れるように、 α_1 および α_2 が大きいかほど定常均衡における接続事業者の契約数は設備事業者の契約数に比して小さく、 β_1 が大きければその比率は小さく、 β_2 が大きければその比率は大きくなる。

言い換えれば、両事業者のロジスティック効果が弱く、接続事業者の捕食効果が強く、設備事業者の被食効果が弱い場合に、長期均衡における接続事業者の契約者数は相対的に大きい。ロジスティック効果が弱いとき、飽和状態になるときの市場規模は大きいため、このことは、両事業者の契約数で表される市場規模が大きく、設備事業者は接続事業者からの競争の影響を受けることが少なく、他方、接続事業者は設備事業者の契約者ベースに食い込む力が強いとき、長期的に接続事業者の契約数は相対的に大きくなることを示している。

さらに、自然成長率の大小が接続事業者の長期的契約数に与える影響は興味深い。(8)式の右辺を ϵ_1 および ϵ_2 で偏微分すると次が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial \epsilon_1} \left(\frac{N_2^*}{N_1^*} \right) = \frac{\epsilon_1 (\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2)}{(\alpha_1 \epsilon_1 + \beta_1 \epsilon_2)} > 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \epsilon_2} \left(\frac{N_2^*}{N_1^*} \right) = \frac{\epsilon_1 (\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2)}{(\alpha_2 \epsilon_1 + \beta_1 \epsilon_2)} < 0$$

これによると、設備事業者契約数の自然増加率が高いほど定常解における接続事業者契約数は相対的に大きく、接続事業者の自然消滅率が高ければ、定常解における接続事業者契約数はそれだけ小さい。後者の性質は当然予想されることであるが、前者の性質は興味深い。

以上の考察を命題にまとめておけば、次のようになる。

命題1 接続事業者が設備事業者の設備に依存しながら設備事業者と同一のサービスを提供して契約数をする場合には、サービス市場のロジスティック効果が弱く、接続事業者の依存効果が強く、設備事業者の自然成長率が高く、接続事業者の持久力が強いほど安定的な定常均衡が出現する可能性は高く、また、定常均衡における接続事業者の市場シェアも大きくなる。

VI. 政策効果の分析

このような動学経路を外生的な政策によって誘導す

ることができるであろうか。動学経路を決定するパラメタは α 、 β 、 ϵ_1 、および ϵ_2 である。これらに働きかける政策手段を s 、 t 、 u 、および v とする。すなわち、政策的な影響を受けたそれぞれのパラメタは $\alpha(1-s)$ 、 $\beta(1+t)$ 、 $\epsilon_1(1+u)$ 、および $\epsilon_2(1-v)$ と書くことができるでしょう。

s はその値が大きいほどロジスティック係数が低下する効果をもつ政策手段である。ロジスティック係数の低下は、サービス市場が飽和することなく拡大する可能性が高まることを意味するため、ここでは s を引き上げる政策を「市場成長政策」と呼んでおこう。例えば、設備やサービスの品質向上を促し、市場の外延が拡大することを目指す政策は、この例に当たると考えられる。他方、 t の上昇は、接続事業者の設備依存係数を高める効果をもつ。設備事業者の設備規模の拡大によって接続事業者の成長率が高まる効果を増強する政策の例としては、設備の開放義務を拡大する政策等が考えられる。したがって、 t を引き上げる政策は設備の「開放促進政策」と呼ぶことにしよう。

これらに対して u および v は、設備事業者および接続事業者の自然成長率に働きかける政策である。 u の上昇は設備事業者の自然成長率を高め、 v の上昇は設備事業者の自然消滅率にブレーキをかける。そこで、 u を引き上げる政策を「設備事業者の設備拡大促進政策」、 v を引き上げる政策を「接続事業者の衰退防止政策」と名付けよう。

こうした政策が導入された場合に、図2のような安定的定常解が出現するための条件は(7)式を修正した、

$$\frac{\epsilon_1(1+u)}{\alpha_1(1-s)} > \frac{\epsilon_2(1-v)}{\beta(1+t) - \alpha(1-s)} \quad (9)$$

となる。また、定常均衡における接続事業者の市場シェアは

$$\frac{N_2^*}{N_1^* + N_2^*} = 1 - \frac{\alpha(1-s)}{\beta(1+t)} \left\{ 1 + \frac{\epsilon_2(1-v)}{\epsilon_1(1+u)} \right\} \quad (10)$$

で与えられる。これらに基づいて、4つの政策手段の効果を分析してみると、それらはすべて安定的定常解の出現可能性を高める効果と、定常均衡における接続事業者の市場シェアを引き上げる効果をもつことが分かる。

ここで最も興味深い結果は、設備拡大促進政策の効果である。すなわち、常識的には、ボトルネック設備を有する設備事業者の成長を抑制することによって、共存均衡が維持され、あるいは、長期的な接続事業者の市場シェアの上昇が期待されると考えられるかもしれない。しかし、政策的に u にマイナス値を与えて設備事業者の成長を抑制すれば、(9)式から明らかのように、安定的な定常解が成立する可能性は低くなり、(10)式から明らかのように、定常解における接続事業者の市場シェアは低下する。極端な場合、設備事業者の設備拡大傾向を大きく抑制すれば、結局、接続事業者は事業継続が不可能となり、設備事業者のみが生き

残る均衡が出現する。

ここでの考察を次の命題にまとめておこう。

命題2 安定的な定常均衡の実現をもたらすためには、市場全体の成長を促進し、接続事業者が設備開放によって成長できる環境を整備し、設備事業者の設備拡大を促進し、接続事業者の衰退を抑制する政策が有効である。それらの政策がとられたなら、そうでない場合に比べて、定常均衡における接続事業者の市場シェアは高くなる。

Ⅶ. 結 語

本稿においてわれわれは、ネットワーク事業者の競争を、生物学のLotka-Volterraモデルを援用して記述し、2つの事業者が互いに競争する動学的態様を微分方程式体系の解として分析した。確かにここでの分析は、経済学が伝統的に分析の対象とする価格、費用、利潤等の視点を欠いている。そのため、企業行動の分析が浅く、価格を中心とする企業の戦略的行動に十分な注意が払われていない、との批判があり得る。

しかし、価格戦略、営業戦略、技術開発戦略、雇用戦略あるいは企業の財務的安定性なども、マクロの視点から見れば、すべてその企業の事業拡大のダイナミクスに還元されるとも言えよう。その意味では、本稿で提示した分析は、これまでの伝統的な経済学の分析を補完する視点を追加するものと思われる。

さらに、本稿における政策分析も、課税・補助金や数量規制のように、政策手段を明示した分析ではなく、事業者の市場拡大を規定するパラメタへの影響を通じる効果を論じたに過ぎない。この点についても、明示的な政策手段の効果が議論されていないという批判があり得ると同時に、現実の政策手段はビジョン政策から裁量的判断を含む暗黙の理解までのグラデーションの中で、全体として企業行動に影響を及ぼすとの考え方に立てば、あながちここでの分析の意義を否定すべきでないとの考えも成り立つであろう。

いずれにしても、ここに報告したのは極めて初歩的なLotka-Volterra型モデルであり、これからネットワーク産業の競争モデルとして改良していくべき点が多く含まれていることは言うまでもない。しかし、生物学における研究が経済学の課題解決に有用である可能性は十分示すことができたのではないだろうか。

参考文献

- Economides, Nicholas (1986), *Economics of Networks*. (<http://www.stern.nyu.edu/networks/site.html>)
- Hayashi, Kenta (2005), "The Analytical Solution to the Rohlfs Equation: A Note," mimeo.
- Lotka, A. (1925), *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins (Reprinted 1956 by Dover Press).
- Rohlfs, Jeffrey (1974), "A Theory of Interdependent Demand for a Communications Service," *Bell Journal of Economics and Management Science* 5, no.1,

- Spring, 16-37.
- Rohlf, Jeffrey (2001), *Bandwagon Effects in High-Technology Industries*, MIT Press.
- Uzawa, H. (1962), "Walras Existence Theorem and Brouwer's Fixed Point Theorem," *Economic Studies Quarterly*, 8.
- Verhulst, P.F. (1838), "Notice sur la loi que la population suite dans son accroissement," *Correspondence Mathématique et Physique*, 10, 113-121.
- Volterra, V. (1928), "Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together," *Journal du Conseil, Conseil International pour L'Exploration de la Mer*, 3, 2-51.
- Walras, Léon (1874), *Elements d'économie politique pure ; ou, Théorie de la richesse sociale* (レオン・ワルラス 著久武雅夫訳『純粋経済学要論』岩波書店、1983年)
- 依田高典 (2001) 『ネットワーク・エコノミクス』(日本評論社)
- 寺元 英 (1997) 『数理生態学』(朝倉書房)
- 林 敏彦 (1992) 「ネットワーク経済の構造」林・松浦編著『テレコミュニケーションの経済学：寡占と規制の世界』(東洋経済新報社) 第5章
- 林 敏彦 (2005) 「通信ネットワークの競争：Lotka-Volterraモデルによるアプローチ」『情報通信学会誌 No.78』2005年9月号、Vol. 23, No.2
- 誌も発行されている。
- 4 Lotka (1925) およびVolterra (1928) が原典である。
- 5 ネットワーク効果に関する網羅的文献リストは、Economides (1986) が運営するウェブサイト (<http://www.stern.nyu.edu/networks/site.html>) に見ることができる。日本では、林敏彦 (1992) や依田高典 (2001) がネットワーク効果を取り上げている。
- 6 Rohlf (2001) はまさにそのことを強調している。
- 7 たとえば、林 (1992) は2つのネットワークが競争する場合、競争均衡と資源の最適配分との関係は失われる可能性を指摘した。
- 8 Verhulst (1838)。
- 9 K.Hayashi (2005) 参照のこと。
- 10 以下の議論は、林敏彦 (2005) の一部を再録したものである。
- 11 K. Hayashi (2005) が明らかにしたように、ネットワーク効果 (外部性) が存在する市場における加入者 (需用者) の動態は、生物学におけるロジスティック方程式によって表される。その場合のロジスティック係数は1であるが、ここで仮定するロジスティック係数がそれぞれ1であっても以下の議論は影響を受けない。
- 12 捕食係数と被食係数という言葉は生物学からの借用である。
- 13 設備インフラが物理的なボトルネックとなつて、2つの事業者がゼロサムゲームを展開する状況は、ここでは想定されていない。
- 14 生物学の文献においてこの微分方程式体系は、2つの種があり、一方が捕食者として他方を捕食する関係を表現したLotka-Volterra方程式あるいはLotka-Volterra競争モデルの一例として知られている。そのようなモデルにおいて、は種内競争係数、は捕食係数と呼ばれている。たとえば、寺元 (1997)、97頁参照。

Notes

- 1 ワルラスは数学者のポアンカレと親交があり、ポアンカレから関数の最大値問題について指導を受けながら、ついに理解できなかったと言われている。
- 2 このことを指摘したのは宇沢弘文 (1962) であった。
- 3 既に *Journal of Evolutionary Economics* という学術

(平成17年11月7日受理)