

数理エコシステムはIoT時代の ツールとなり得るか

氏名† 池末成明

所属† ダイレクトコンサルティング
はじめに

スマートシティを支えるIoTネットワークは多様な市場を前提としたアクセスネットワークと伝送路を融合する巨大な容量のエコシステムの創造が必要である。本稿ではエコシステムの基本方程式であるLotka-Volterra方程式(以下「LV方程式」と呼ぶ)を使ってアクセスネットワークについてLV方程式によるモデルを検証し、その限界を知ることにある。

1 LV方程式の分類とパラメータの意味

1.1 LV方程式の分類と実証研究の状況

林敏彦[2005]は水平関係の「種間競争」を例えば携帯電話各社相互の競争等、垂直関係を「設備事業者と接続事業者の競争」等の競争みなした。設備事業者はNO(Network Operator)、接続事業者はVNO(Vertical Network Operator)に相当する。「VNOはNOに依存し、NOの顧客でありながらNOは同じ顧客をめぐる競争する」ため垂直市場のVNOとNOは「被食者・捕食者関係」でも宿主と寄生の関係でもない。進化ゲームには種が相互にお互いの成長を促進する「共生する2種のモデル」があり、2つの種双方の個体数の大きい均衡点で安定する。本稿では「共生する2種のモデル」を共創市場と呼ぶ。NOとVNOの共存は、垂直な共創市場として政策的に設計できる。一方テレビとインターネットの連携等が進めば共創市場は水平市場にもなるだろう。

筆者の実証研究によれば、このうち水平市場だけがモデルとして有効である、そこで本稿では2つのサービスの水平市場について実証を行うが、準備のために理論面の議論を紹介する。

1.2 LV方程式の導入

2つのサービスの契約数に関するLV方程式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1(\varepsilon_1 + \mu_{11}x_1 + \mu_{12}x_2) \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_2(\varepsilon_2 + \mu_{21}x_1 + \mu_{22}x_2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで μ_{11} と μ_{22} はそれぞれサービス1とサービス2の自身の契約数 x_1 と x_2 に影響する自己作用、 μ_{12} はサービス2がサービス1の契約に影響する相互作用、 μ_{21} はサービス1がサービス2の

契約に影響する相互作用をいう。 ε_1 と ε_2 は、それぞれサービス1とサービス2の成長率である。

水平市場の成長率はサービスが単独で存在する場合の契約数の増加率である。成長率の符号は両サービスとも正となる。水平市場では相互に相手を減じる戦略をとるためサービス1と2の相互作用の符号は負となる。また水平用強度の符号はサービス1も2も負である。LV方程式の1種のサービスの変動を表すロジスティック関数と同様に市場規模の制約からサービスの契約数が増えると成長率が抑制されるからである。

この方程式の特別な場合として、1つのサービスの契約数に関する方程式に書き改めると、次式ようになる。

$$\frac{dx}{dt} = x_i(\varepsilon - \mu x) \quad (2)$$

この方程式のひとつの解は通信サービスの成長を良く近似するロジスティック成長曲線となる。また左辺を時間ではなく普及率とするとこれはRoflsのネットワーク外部性を表す方程式となる。LV方程式が情報通信産業を動的に記述するモデルとして期待できる発端はここにある。

1.3 LV方程式の性質

水平市場にしぼってLV方程式の性質を概観する。まず(2)式を天下り的ではあるが、次の(3)式を使って(4)式に変形する。

$$K_1 = \frac{\varepsilon_1}{-\mu_{11}} > 0, \quad K_2 = \frac{\varepsilon_2}{-\mu_{22}} > 0, \quad (3)$$

$$\gamma_{12} = \frac{-\mu_{12}}{-\mu_{11}} > 0, \quad \gamma_{21} = \frac{-\mu_{21}}{-\mu_{22}} > 0$$

$$\frac{d}{dt} x_1 = \varepsilon_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1 + \gamma_{12} x_2}{K_1}\right) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} x_2 = \varepsilon_2 x_2 \left(1 - \frac{\gamma_{21} x_1 + x_2}{K_2}\right)$$

ここで右辺の契約数の変動が停止する均衡点は(4)式の左辺が0であることから、その条件は、原点に加えて各サービスの(5)式となる。

$$x_1 + \gamma_{12} x_2 = K_1, \quad \gamma_{21} x_1 + x_2 = K_2 \quad (5)$$

(5)式より、 K_1 はサービス2の契約数が0となるとき(サービス2が消滅するとき)のサービス1の均衡市場規模、 K_2 はサービス1の契約数が0となるとき(サービス1が消滅するとき)のサービス2の均衡市場規模である。

① 一方のサービスみが生き残る条件

(5)式の直線が第一象限で交わらない場合は、サービス1または2の一方のみが生き残り、サービス1は K_1 、サービス2は K_2 で均衡市場規模となる。この市場をWinner-Takes-All市場(WTA

市場)と呼ぶ。どちらが生き残るかは2つの直線の位置関係による。すなわち

$\gamma_{12} K_2 < K_1$ かつ $\gamma_{21} K_1 > K_2$ のときサービス1が生き残るWTA市場、

$\gamma_{12} K_2 > K_1$ かつ $\gamma_{21} K_1 < K_2$ のときサービス2が生き残るWTA市場となる。

② サービス1または2が共存する条件

サービス1と2が共存する場合の条件としては、(5)式の直線で表される次の(6)であらわされる交点がグラフの第一象限で交わる必要があり、左がサービス1の、右がサービス2の均衡市場規模となる。

$$\left[\begin{array}{cc} K_1 - \gamma_{12} K_2 & K_2 - \gamma_{21} K_1 \\ 1 - \gamma_{12} \gamma_{21} & 1 - \gamma_{12} \gamma_{21} \end{array} \right] \quad (6)$$

$\gamma_{12} K_2 < K_1$ $\gamma_{21} K_1 < K_2$ ($\gamma_{12} \gamma_{21} < 1$ のとき)

この条件下では(6)の交点の均衡点は時間に対して谷になるので、サービス1と2は(7)の交点で安定に均衡して共存する。条件式から共存市場を維持したい場合は相互に相手のテリトリに深入りしない自制が必要であり、政策的にも強者に不利な非対称な規制を課す必要である。この共存市場を多様性市場またはダイバシティ市場とも呼ぶことにする。

$\gamma_{12} K_2 > K_1$ かつ $\gamma_{21} K_1 > K_2$ ($\gamma_{12} \gamma_{21} > 1$ のとき)

この条件下では(7)の交点の均衡点は時間に対して山になるので、サービス1と2は交点で共存するが、不安定均衡である。このためサービス1か2の一方がその均衡市場規模のみが生き残るWTA市場となる。これを双安定という。

2 検証

2.1 FTTHとDSLの契約数

2002年6月から2016年3月までの四半期ごとのデータで重回帰分析を行ってLV方程式のパラメータを推定すると契約数の推定値と理論値は合致した。またこの市場は、理論的にも実証的にもFTTHが独り勝ちするWTA市場でFTTHの均衡市場規模は3333万である。

だが、期間をもっと手前までとると、この水平市場はFTTHとDSLの共存市場となる。

2.2 固定電話と携帯電話

日本の固定電話と携帯電話の加入者の変動を調べると、一部の期間で契約数の推定値と理論値は合致した。固定と携帯の市場は水平市場で不安定な共存市場を持つ双安定な市場である。

この結果、LV方程式のモデルでは、共存市場、WTA市場、双安定なWTA市場の3パターンがすべて出現したこととなる。

2.3 2Gと3G

2005年9月から2008年12月のデータによれば、3Gが勝利する水平市場のWTA市場であり、実測値と推定値の変動はほぼ合致するが、統計的信頼が低い。

2.4 携帯電話とPHS

携帯電話とPHSは、都合良く期間を選ぶと水平市場となり、推定値と理論値も合致するが、統計的な信頼性は低い。

3 今後の研究課題

3.1 3種以上のサービス

筆者は、水平市場での3つ以上のサービスや3社以上の企業の関係を調べたが、まだLV方程式に適合する関係は発見できていない。

3.2 差別化モデル

LV方程式のパラメータも動的に変動している。このパラメータがサービスの価格や差別化の指標となりうるか調べていることも今後の課題である。数理生態学の教えるところをネットワークサービスに置き換えると、差別化が大きいと2つのサービスは生き残り、差別化の小さい市場では広範囲な市場を狙ったサービスが生き残る。またLV方程式のパラメータは、差別化の頻度(改革や価格の改定の頻度)に相当することが理論的にはわかっている。

3 おわりに

LV方程式のパラメータは、前述したように差別化の頻度(改革や価格の改定の頻度)に相当することが理論的にはわかっているが、このモデルはイジングモデルと同値である。複雑ネットワークで議論されてきたマイクロソフトの独占がボゾンの縮退とする議論は正しくない。さらに差別化が小さいとひとつのサービスが勝利するWTA市場となる。これをガウゼの排他律というが、これはパウリの排他律を思い起こす。電子のスピンは+と-の2つであるが、FTTHとDSLが2種の相互作用と考えると必然的な結論に思える。ボズンは3つのスピンをもつが、3つのサービスのモデルを検討したが実証できない。これはボズンに相互作用はないからだと思われる。こうした背景からこのモデルの量子ゲームでの実証研究も試みているが、成功していない。

こうした中、グーグルとNASAはイジングモデル型の複数のスピンをもつイジングモデル型の量子コンピュータの開発に成功した。今後、このIoT市場モデルは量子コンピュータでのシミュレーションが必要かもしれない。

参考文献

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』第24号 69-80頁 情報通信学会