複雑な相互作用ネットワークを導入した人工市場シミュレーション

Artificial Market Simulation with Embedded Complex Network Structures

内田 誠
Makoto Uchida

東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, the University of Tokyo
uchida@race.u-tokyo.ac.jp

白山 晋
Susumu Shirayama

東京大学人工物工学研究センター
Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), the University of Tokyo
sirayama@race.u-tokyo.ac.jp

keywords: complex networks, network effect, artificial markets, multi-agent simulations, communication service markets

Summary

We investigate a factor of the ‘network effect’ that affects on communication service markets by a multi-agent based simulation approach. The network effect is one of a market characteristic, whereby the benefit of a service or a product increase with use. So far, the network effect has been studied in terms of macroscopic metrics, and interaction patterns of consumers in the market were often ignored. To investigate an influence of structures of the interaction patterns, we propose a multi-agent based model for a communication service market, in which embedded complex network structures are considered as an interaction pattern of agents. Using several complex network models as the interaction patterns, we study the dynamics of a market in which two providers are competing. By a series of simulations, we show that the structural properties of the complex networks, such as the clustering coefficient and degree correlations, are the major factors of the network effect. We also discuss an adequate model of the interaction pattern for reproducing the market dynamics in the real world by performing simulations exploiting with a real data of social network.

1. 緒 言

多数のプレイヤーの相互作用から生じる市場現象は、しばしば複雑で非線形な振る舞いを呈する。それを適切に分析、理解し、予測、制御することは、効率的な市場の構築や、効果的な経済政策やマーケティング施策の立案という点で重要である。複雑な市場現象を計算機シミュレーションの立場から分析する手法のひとつとして、人工市場シミュレーションがある。人工市場とは、市場における主体（企業、消費者など）をエージェントに見立てたマルチエージェントモデルとして計算機上に実装された仮想的な市場である [和泉 03]。様々な設定でのシミュレーションを行うことで、あるパラメータ設定における現象の観察や、ある特定の現象の要因を探るなどの分析ができる。

本研究では、市場現象の一つとして知られる‘ネットワーク外部性’（もしくは、‘ネットワーク効果’）に着目する。ネットワーク外部性とは、同じ財やサービスの利用者が多いほど、消費者がその財やサービスの消費から得ら

れる効用が高まる効果である [Katz 85]。ネットワーク外部性が作用する市場では、よく売れている財やサービスを選ぶことの効用がより高くなり、さらにその財やサービスが選択されやすくなるという正のフィードバックが働く [Arthur 90]。そのため、ネットワーク外部性はデファクト・スタンダードとなる規格の出現や、ある財やサービスが一人勝ち（Winner-Takes-All）するなどの現象の要因であると考えられている [Arthur 96]。実際に、ネットワーク外部性市場をモデル化した分析に関する研究は多い [Church 92, Katz 92, Arthur 93, Wendt 00, Frels 03, Weitzel 02, Khalak 03, Phan 03, 川村 05, 金子 06]。

人工市場シミュレーションを用いる研究では、利用者間のミクロレベルでの相互作用を直接的にモデル化し、マルチエージェントシミュレーションを用いて市場の局所性やシェアの逆転現象などが再現されている [井庭 01, 井庭 03]。このような取り組みの中では、相互作用を行うエージェント空間構造の影響が指摘されている。実際、Lee らは利用者数やシェアのようなマクロ統計量に過度に注目

し、利用者間のネットワーク構造を見落とすことは、分析を見誤ることにつながると指摘している [Lee 06]。一方で、現実の社会的なコミュニケーションネットワークは、規則的でも完全に無秩序でもない、複雑な構造を有することが明らかにされており [Newman 06]、そのような構造はネットワーク外部性の作用に重要な影響を与えるものと考えられる。

本研究の目的は、人工市場シミュレーションの手法を用いて、ネットワーク外部性の要因を分析することである。電話やメールに代表されるコミュニケーションサービスの市場を題材とし、エージェントのコミュニケーションネットワークの構造に特に着目した人工市場モデルを構築し、作用するネットワーク外部性の影響について調べる。具体的には、複雑ネットワークモデルの導入によって相互作用の空間構造を制御したネットワーク上で利用者をエージェントとしてモデル化した人工市場モデルの構築およびシミュレーションを行い、エージェントの空間構造とサービス事業者のシェアとの関係性を分析する。その結果から、ネットワーク外部性の効果と、ネットワーク構造の統計的指標の特徴との関係性を明らかにすることを目的とする。さらに、現実世界のコミュニケーションネットワークの一例として、Eメールによるコミュニケーションネットワークの実データを用いて提案モデルによる数値実験を行い、その結果から現実の市場におけるネットワーク構造の適切なモデルについて考察する。

2. モデル

本論文では、ネットワーク外部性が作用する市場の例として、携帯電話やメール、ショートメッセージ等の利用を念頭においたコミュニケーションサービスの市場を対象とする。2つの事業者がシェアを競争している市場を想定し、そのどちらかを利用する利用者の意思決定のモデルと、コミュニケーションのネットワーク構造を、人工市場のモデルとして考える。

2.1 効用関数と利用者の意思決定モデル

本論文では利用者の効用関数として金銭コストに関する部分のみを考える。これは、例えば携帯電話サービスを考えた場合、通話料や初期費用の負担といった直接的な費用のモデル化に相当する。

利用費用はサービスの利用量と、コミュニケーション相手の人数に依存するものとし、利用者は金銭コストを最小化するように事業者を選択するものとする。このとき、単位期間あたりの相手1人あたりのサービス利用量

を x_i とするとき、利用者 i の効用関数 f を次式とする。

$$\begin{aligned} f(x_i, \alpha^S, \alpha^D, k_i^S, k_i^D, \delta) \\ = -\min \left\{ (\alpha^S k_i^S + \alpha^D k_i^D) x_i, \right. \\ \left. (\alpha^S k_i^D + \alpha^D k_i^S) x_i + \delta \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、添え字 S および D は、それぞれ利用者 i と同じ事業者、および違う事業者をあらわす。 k_i^S および k_i^D は、利用者 i の周囲で、 i と同じ、および異なる事業者を利用する利用者の数である。 α^S は同じ事業者を利用する相手に対する単位量あたりのサービス利用費用、 α^D は異なる事業者を利用する相手に対する単位量あたりのサービス利用費用を表す。本論文では $\alpha^S < \alpha^D$ なる定数であることを仮定する。 δ は異なる事業者に変更するための乗り換え費用であり、すべての利用者に対して等しい定数とする。

このとき、 x_i の決定方法として、次の2種類のルールを考える。第一のモデルでは、相手1人あたりのサービス利用量は全利用者における平均 $\bar{X}$ に等しいものと仮定する。このとき、利用者 i の総サービス利用量は $(k_i^S + k_i^D) \bar{X}$ となる。第二のモデルでは、各々の利用者の総サービス利用量 X_{total} が正規分布に従うものと仮定する。すなわち、相手1人あたりの利用量 x_i は $x_i = X_{total} / (k_i^S + k_i^D)$ となる。以降、前者をモデル I、後者をモデル II と呼ぶ*1。実際の携帯電話利用者の利用状況を調査した研究によれば、相手先が多い（次数が高い）利用者ほど、相手1人あたりの平均通話時間は単調に減少するという報告がある [佐々木 05]。この文献では、これを時間的な制約等により通話相手が多いと一人あたりに対してかけられる時間が減少するためであると考察しているが、定性的な報告にとどまり、具体的な関数形は明らかにされていない。そこで、本論文ではこの要素を単純化し、モデル I は次数の増加による平均通話時間の減少を無視したモデル、モデル II は次数の増加による平均通話時間の減少を、次数に反比例する形で取り入れたモデルであるとして考える。

これらのモデルに従い、ある利用者 i は効用関数を最大化するように、現在の事業者を利用し続けるか、異なる事業者に乗り換えるかの意思決定を行う。具体的には、ある時刻 t にエージェントを1つランダムに選択し、式(1)に従って f を最大化するように、利用する事業者を変更するか否かを決定する。このとき、意思決定と事業者の変更は非同期的に行う。すなわち、あるエージェントは全エージェント数 N によって正規化した時間ステップ $T = t/N$ に1回の割合で、事業者の選択の意思決定と変更を行う。

2.2 ネットワークモデル

利用者のコミュニケーションの空間構造として、図1に模式的に示すようにノードとエッジによって表現され

*1 モデル II において、 $\langle k \rangle$ をコミュニケーション相手の数の平均（平均次数）とすれば、 X_{total} の平均は $\bar{X} \langle k \rangle$ と等しい。

図 1 コミュニケーションネットワークの概念図

るネットワーク構造を考える．図 1 では，中央の で示した利用者は，事業者 B を利用していて，エッジの数が 6（次数が 6）であり，事業者 A の利用者 4 人，事業者 B の利用者 2 人と隣接し，恒常的にコミュニケーションを取っていることを表している．

近年の多くの研究により，現実の社会的ネットワークでは，べき乗分布的な次数分布，高いクラスタリング係数^{*2}，短い平均経路長^{*3}，正の次数相関^{*4} など，特徴的ないくつかの性質を持つことが明らかにされつつある [Boccaletti 06, Newman 06]．実際の携帯電話利用者の調査でも，利用者の次数分布はピークを持たずに高次の部分が厚い，いわゆるヘビータイルな確率分布になることが報告されている [佐々木 05]．

そこで，本論文ではこのような空間構造を，複雑ネットワークモデルによって与える．ネットワークモデルの導入によってコミュニケーションネットワークの統計的性質を変化させながら，ネットワークの構造と，その結果現れるネットワーク外部性の効果との関係を調べる．本論文では，格子，ランダムネットワーク [Erdős 59]，WS モデル [Watts 98]，BA モデル [Barabási 99]，KE モデル [Klemm 02]，CNN モデル [Vázquez 03] の 6 種類のネットワークモデルを用いた．以下，各モデルについて述べる．

§1 格子 (Lattice)

格子モデルは，規則的に配置した近隣 n ノードと接続した正則なネットワークである．このとき，すべてのノードの次数は一樣となり，平均経路長 L はノード数 N に

*2 クラスタリング係数 C とは，あるノードの隣接ノード間にエッジが存在する確率とであり，以下の式で定義される．ここで N はノードの総数， k_i ， E_i はそれぞれノード i の次数と，ノード i に隣接するノードの相互間に存在するエッジの総数を表す．

$$C = \frac{1}{N} \sum_i \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

*3 平均経路長 L とは，任意の 2 ノード間の最短パスにエッジがいくつ存在するかという最短パス距離をすべてのノードの組み合わせについて平均したものである．

*4 次数相関とは，あるエッジの両端のノードの次数のピアソン相関係数である．正の次数相関とは，次数の高いハブになっているノード同士が互いに接続している，あるいは次数の低いノード同士が互いに接続している傾向にあることを意味する．

表 1 ネットワークモデルの構造的性質．下段カッコ内は $N = 3600$ ， $\langle k \rangle = 10$ の場合の実測値．

	次数分布	L	C	次数相関
Lattice	一樣	大 (180)	大 (0.67)	ナシ
ER	標準分布的	小 (3.80)	小 (0.0027)	ナシ
WS	標準分布的	小 (4.62)	大 (0.35)	ナシ
BA	べき乗分布的	小 (3.36)	小 (0.015)	ナシ
KE	べき乗分布的	小 (4.37)	大 (0.65)	負
CNN	べき乗分布的	小 (5.14)	大 (0.40)	正

比例する．またクラスタリング係数 C は N によらず定数のオーダーとなり比較的大きくなる．

§2 ランダムネットワーク (ER)

ランダムネットワーク (Erdős-Rényi モデル，以下 ER モデルと呼ぶ) [Erdős 59] は，ノード数とエッジ数を固定し，エッジをランダムに配置して生成するネットワークである．ネットワーク外部性に関する従来研究においてネットワーク構造に着目したものでは，ランダムネットワークを考えているものが多い [Arthur 93, Frels 03, Khalak 03]．ランダムネットワークでは，次数分布は平均次数付近にピークを持つポワソン分布となり， L は $\log N$ に比例し， C は N の増加とともにゼロに近づく．

§3 WS モデル

WS (Watts-Strogatz) モデル [Watts 98] は，格子とランダムネットワークの中間のモデルであり，特に 'small-world モデル' として知られる．WS モデルは，格子のエッジをある確率 p でランダムに繋ぎかえることで生成する．繋ぎかえられたエッジは，格子の中で「ショートカット」の役割を果たし，これが L を小さくする．本論文では，繋ぎかえの確率 p を 0.1 としたものをを用いる．

§4 スケールフリーネットワーク

現実の社会的ネットワークの主要な特徴の 1 つとして，各ノードに接続するエッジの次数分布 $P(k)$ が冪乗分布 $P(k) \propto k^{-\gamma}$ に従うことが多くの事例で観察されており，「スケールフリー」という性質として着目されている．スケールフリーの性質を持つネットワークモデルとして，本論文では BA (Barabási-Albert) モデル [Barabási 99]，KE (Klemm-Eguíluz) モデル [Klemm 02] および CNN (Connecting Nearest Neighbor) モデル [Vázquez 03] の各モデルを扱う．これらは順次新たなノードが誕生して，既存のノードと接続するという「成長」のメカニズムを，異なる側面からモデル化したものである．いずれも次数分布がべき乗分布に従うが，その他の性質でそれぞれ異なる特徴を持つことが知られている．これらのネットワークモデルの性質は，表 1 のようにまとめられる．

3. 計算機実験

3.1 準安定状態の発現

前章で述べた意思決定モデルおよび相互作用のネットワークモデルに従い、マルチエージェントシミュレーションによる数値実験により、2 事業者の競争を模擬した市場のダイナミクスを計算機シミュレーションによって調べる。初期状態として、2 つの事業者が市場全体の 50% ずつのシェアをランダムにもつ状態を与える。このとき、2 つの事業者の $\alpha^S, \alpha^D, \delta$ のパラメータはすべて等しく設定した。すなわち、2 つの事業者におけるサービスやコストは対称的で、差異がない状態を考える。これは、サービスの品質や価格が等価であるにもかかわらず、市場に内在するコミュニケーションの空間構造に起因した外部性が引き起こされるシナリオを意図している。

図 2 および図 3 に、モデル I およびモデル II によるシミュレーションにおける事業者のシェアの典型的な時間発展を示す。エージェント数は $N = 3600$ とした。図からわかるように、モデル I、モデル II どちらの意思決定モデルにおいても、初期状態におけるシェアが等しいにもかかわらず、利用者のネットワーク上の分布の違いによっていずれかの事業者が次第に卓越する準安定状態に達する。2 つの事業者のパラメータはすべて同一であるので、「どちらが」卓越したか、という点は意味を持たないが、十分時間が経過した後に卓越している事業者（勝者:winner と呼ぶ）のシェアが収束する値は試行によらず一定の範囲に収まることを確認した。利用者の意思決定モデルを考慮すると、同じ事業者を選択する方が効用が高まり、さらにその事業者が選択されやすくなることを意味する。そこで、本論文では、勝者の市場シェアの大きさを市場に作用したネットワーク外部性の強さの尺度であると考えた。

エージェントのコミュニケーション量に正規分布によって不均一性を導入したモデル II のほうが、モデル I より安定までに長いステップを要する。以降、モデル I では、シェアの安定する $T = t/N = 45$ ステップ以降の 5 ステップ ($T = 46$ から $T = 50$) における平均を、モデル II では $T = t/N = 450$ ステップ以降の 50 ステップ ($T = 451$ から $T = 500$) における平均を、それぞれ終状態におけるシェアとする。また、各パラメータについて、モデル I では 500 回、モデル II では 100 回の試行における平均値を結果として採用する。

3.2 ネットワークモデルを用いたシミュレーション

図 4 および図 5 に、モデル I の意思決定モデルによる、最終状態における勝者のシェアを、乗り換えコスト δ に対する関数として示す。図 4 には $\langle k \rangle$ による比較、図 5 には $\bar{X}$ による比較を示す。図中で、誤差棒は 500 回の試行における標準偏差を示している。以下、背後のネットワーク構造の違いによる結果に対する影響に着目する。

図 2 典型的な 1 回の試行における、勝者となる事業者のシェアの時系列変化 (モデル I, $\langle k \rangle = 10$, $\bar{X} = 100$, $\alpha_S = 20$, $\alpha_D = 25$, (A) $\delta = 500$, (B) $\delta = 2500$.)

図 3 典型的な 1 回の試行における、勝者となる事業者のシェアの時系列変化。(モデル II, $\langle k \rangle = 10$, $X_{total} = N(100\langle k \rangle, 100\langle k \rangle/3)$, $\alpha_S = 20$, $\alpha_D = 25$, (A) $\delta = 500$, (B) $\delta = 2500$.)

初期状態におけるシェアを 1:1 としたので、 $\delta \rightarrow \infty$ とすると初期状態から動かず、勝者のシェアは 50% に近づくことはモデルより自明である。ところが、 δ が小さ

図 4 準安定状態における勝者のシェア (モデル I, 誤差棒は 500 回の試行における標準偏差をあらわす, $\bar{X} = 100$, $\alpha_S = 20$, $\alpha_D = 25$, (A) $\langle k \rangle = 8$, (B) $\langle k \rangle = 10$.)

図 5 準安定状態における勝者のシェア (モデル I, 誤差棒は 500 回の試行における標準偏差をあらわす, $\langle k \rangle = 10$, $\alpha_S = 20$, $\alpha_D = 25$, (A) $\bar{X} = 50$, (B) $\bar{X} = 150$.)

い領域では、背後のネットワーク構造に強く依存した自明ではない値をとる。 δ が小さい領域では、ER モデルと BA モデルにおいて、勝者のシェアが大きくなり、ネットワーク外部性の効果が強まる。これらに共通する性質として、クラスタリング係数が低い点を指摘することができる。一方、 δ が大きい領域でも、CNN モデルでは勝者のシェアの低下が緩やかであり、強い外部性の効果が観察される。 $\langle k \rangle$ および $\bar{X}$ が大きくなることは、いずれもコミュニケーションの相手、量ともに活発になることに相当する。そのような場合には、同じ δ に対して外部性の効果が強く作用する。また、 $\delta = 0$ の場合のシェアは、 $\langle k \rangle$ や $\bar{X}$ によらず、ネットワークに固有の値をとることがわかる。

図 6 および図 7 に、モデル II の意思決定モデルによる、最終状態における勝者のシェアを示す。各エージェントの総コミュニケーション量 X_{total} は、平均 $\bar{X}\langle k \rangle$ 、標準偏差 $\bar{X}\langle k \rangle/3$ の正規分布乱数により、ステップ毎に異なる値を与えるものとした。図 6 には $\langle k \rangle$ による比較、図 7 には、 $\bar{X}$ による比較を示した。

モデル II においても、十分大きな δ に対しては勝者のシェアは 50% に収束することはモデルより明らかである。しかしながら、実験を行った δ の範囲では異なる振る舞いが観察され、この場合も背後のネットワーク構造に強く依存している。特に、試行によらず一定の狭い値の範囲に安定的に収束し、なおかつ δ に対して安定で明確な

関数関係が認められるクラスと、試行ごとのばらつきが大きく、 δ に対して明確な関数関係を持たない不安定なクラスとの、2 つの異なる振る舞いが観察された。以下、本論文ではこれらのクラスをそれぞれ「安定相」と「不安定相」と呼ぶ。

例えば、図 6(A) では、ER, BA, WS の各モデルでは、100 回の試行で常に一定の範囲に収束し、なおかつ δ に対して単調に増加するという安定相が発現している。図 6(A) の WS モデルでは $\delta \simeq 1000$ の領域までは試行ごとのばらつきは生じているが、 δ に対して安定的で明確な関数関係が認められ、なおかつ、より大きな δ の領域へ滑らかに連続することから、これも安定相に分類されることができる。一方、同じ図 6(A) では、CNN, KE の各モデルでは、試行ごとの標準偏差が大きく、なおかつその平均値も δ に対して安定的で明確な関係を持たないため、不安定相に分類できる。Lattice に関しては、誤差棒は比較的小さいものの、 δ に対する安定的な関係が弱く、不安定相に近いクラスであると考えることができる。安定相では、勝者のシェアの平均値は δ に対して明確な単調増加関数となり、不安定相では δ に対して、ばらつきは大きいものの減少する傾向となるか、もしくはほぼ一定の範囲となる。

KE モデルでは実験を行ったすべての設定について不安定相が観察された。その他の構造では、 $\langle k \rangle$ が小さい場合、もしくは $\bar{X}$ が小さい場合に限って不安定相が発現

図 6 準安定状態における勝者のシェア (モデル II, 誤差棒は 100 回の試行における標準偏差をあらわす. $\overline{X} = 100$, $\alpha_S = 20$, $\alpha_D = 25$, (A) $\langle k \rangle = 8$, (B) $\langle k \rangle = 10$.)

図 7 準安定状態における勝者のシェア (モデル II, 誤差棒は 100 回の試行における標準偏差をあらわす. $\langle k \rangle = 10$, $\alpha_S = 20$, $\alpha_D = 25$, (A) $\overline{X} = 50$, (B) $\overline{X} = 150$.)

し, その他の場合は安定相をとる. クラスティング係数の低い ER モデルと BA モデルの構造では, 強いネットワーク外部性の効果が作用するのはモデル I による実験結果と同様だが, クラスティング係数が高く, モデル I では外部性の作用が弱かった WS モデルでも, モデル II では外部性が強く作用する. 特に, 図 7(A) の設定では, WS モデルと CNN モデルで, δ の増加につれて, 自明ではない δ の値で安定相から不安定相に移行する様子が観察される. このような δ で, 外部性の強さは極大値をとる.

3.3 実際のネットワークを用いたシミュレーション

ネットワークモデルを用いた数値実験により, それぞれのネットワークの性質に対して, 異なる市場の振る舞いが発現することがわかった. それらの結果を, 現実のコミュニケーションネットワークの構造データを用いた数値実験での結果と比較する. そして, ネットワーク外部性の効果に対して複雑ネットワークモデルを導入することの有効性, および実際の市場のネットワークモデルとして再現性の高いモデルについて考察する.

本論文では, 研究目的に公開されている E メール送受信のネットワークの実データを比証のために用いる*5. こ

のデータは文献 [Guimerà 03] で分析されたものであり, スペインのある大学 (*University Rovira i Virgili*) において, ある期間に少なくとも 1 往復の E メールやりとりがあったペアにエッジを定義したものである. 1133 人 (ノード) に 5451 本のエッジが定義されている. 平均次数は $\langle k \rangle = 9.62$ である. クラスティング係数は $C = 0.254$ であり, 同程度のノード数およびエッジ数のランダムネットワークより 10 倍程度大きい. 平均経路長は $L = 3.606$ である. また, 次数分布は指数分布に従うことが報告されている [Guimerà 03].

図 8 および図 9 に, このネットワーク構造を導入し, それぞれモデル I およびモデル II によるシミュレーションの結果を示す. 以下の点について, ネットワークモデルを導入したシミュレーションと同様の結果を得ている.

- モデル I で, $\overline{X}$ が大きくなるにしたがって同じ乗り換えコスト δ に対する外部性の作用が強くなる点.
- モデル II で, 安定相と不安定相が観察される点.
- モデル II で, 特定の δ を境に安定相から不安定相に転移し, そのような δ で外部性の作用が極大値を取る点.

特に, モデル I の場合に, 比較的大きな δ に対しても外部性の作用が比較的緩やかに低下する様子や, モデル II の場合に, 比較的近いパラメータで明確な極大値と, 安定相から不安定相への転移が見られる様子から, CNN モデ

*5 このデータは

<http://deim.urv.cat/%7Eaarenas/data/welcome.htm> で公開されている.

図 8 準安定状態における勝者のシェア (モデル I, 誤差棒は 500 回の試行における標準偏差をあらわす. $\alpha^S = 20$, $\alpha^D = 25$.)

図 9 準安定状態における勝者のシェア (モデル II, 誤差棒は 100 回の試行における標準偏差をあらわす. $\alpha^S = 20$, $\alpha^D = 25$.)

ルを用いたシミュレーションにおける結果と類似性が見られる。この実データと CNN モデルでは、次数分布の形状が指数分布とべき乗分布で異なっているほか、CNN モデルは平均経路長が比較的大きい。また、同程度の C 、同程度の L を持つ他のネットワークモデルでも、実データとは大きく異なるシミュレーション結果を得ている。これらの結果より、より再現性の高いシミュレーションを行うという観点からは、コミュニケーションネットワークのモデルとして適切なネットワークモデルを導入することの重要性が示される。

4. 考察および議論

本章では、ネットワークモデル、および実データを用いた数値実験から得られた結果について考察する。

モデル I の場合、乗り換え費用 δ が小さい領域では、ER モデルと BA モデルにおいて外部性が強く働き、市場の大部分が一方の事業者を利用するという現象が観察される。これらのネットワークに共通する性質は、クラスタリング係数が小さいことである。逆に、クラスタリング係数が高いネットワークでは、「友人の友人」同士が比較的密につながっているため、互いに隣接している利用

者同士で同じサービスの利用価値を向上させ、局所的にバランスしているものと考えられる。しかし、モデル II では、クラスタリング係数が高い WS モデルでも強い外部性の作用が観察される。このことから、エージェントのコミュニケーション量にばらつきがある場合には、クラスタ性の効果が限定的になるものと考えられる。

一方で、次数分布のスケールフリー性、高いクラスタリング係数、短い平均経路長という特徴を共有する KE モデルと CNN モデルでは、モデル I、モデル II のいずれにおいても、CNN モデルのほうに強い外部性の作用が認められる。このことから、CNN モデルの特徴である正の次数相関が、外部性の作用を押し上げる効果があると考えられる。

また、モデル II では、特定の δ の値で外部性の作用が極大値をとる。本論文で提案したシミュレーションモデルのパラメータのうち、 α^S , α^D , δ は事業者の料金設定や、サービス仕様によって決定することができるパラメータである。本論文で提案したようなモデルを用い、適切な相互作用ネットワークを導入してシミュレーションを行い、このような極大値を探索することで、市場に作用する外部性の効果を見積もった上で、事業者がシェア向上のための戦略的に最適なパラメータや、市場全体の効率性を向上させるためのパラメータを決定することに対する支援が可能となると考えられる。

実データを用いた数値実験では、CNN モデルにおける結果と類似した結果が得られている。次数分布はべき乗分布と指数分布で異なるものの、いずれもピークを持たずに比較的裾が長い分布であり、E メール送受信ネットワークにおける高いクラスタリング係数、短い平均経路長といった構造の特徴は CNN モデルでも再現している。このように、実際の市場における相互作用ネットワーク構造を、適切なネットワークモデルによって特徴を再現することにより、相互作用の構造として格子やランダムネットワークを用いた従来のモデル化では捨象していた部分を含めて、市場の振る舞いをより詳細に分析し、その後の施策、戦略立案を支援することが可能になるものであると考えられる。

5. 関連研究

従来のネットワーク外部性に対する分析的な研究の多くは、製品のシェアに代表されるマクロ統計量的な指標にもとづく数理的解析 [Church 92, Katz 92, Arthur 93] や比較的小規模な被験者実験による実証的な分析である。例えば、消費者数、購入者数、製品を嗜好する消費者の数、製品価格、留保価格から効用関数を定め、効用関数にもとづいて、均衡分析やゲーム理論からの均衡解を求める。利用者間の複雑な相互作用をモデル化したものは少ないが、相互作用を簡素化し、エージェントモデルによって分析を試みるものもある [Freis 03, Khalak 03, 川

村 05, 金子 06].

人工市場シミュレーションの手法を用いてネットワーク外部性を分析する上でも, 利用者間のネットワークの影響に着目するものがある. Wendt らは, ネットワーク外部性の分析において, 消費者間の情報伝播を明らかにする必要性を主張し, 独自に定義した *connectivity*, *closeness*, *centrality* というパラメータによって, 消費者間の相互作用ネットワークをモデル化した [Wendt 00, Weitzel 02]. そして, 消費者間の情報伝播に影響を与えるネットワークの性質を明らかにすることを試みている. なお, 生成されるネットワークは, ランダムネットワークを拡張したものである. *connectivity*, *closeness*, *centrality* は, 本論文で述べた複雑ネットワーク研究で用いられる指標とは異なり, Wendt らが独自に定義したものである. したがって, 現実世界の相互作用が生じるネットワークがもつ特徴的な構造を直接再現することを意図したものではない. [川村 05] では, 格子, ランダムネットワーク, WS モデル, BA モデルを用い, 相互作用をもたすネットワークの構造の違いによって, 市場の振る舞いに違いが生じ, その結果マーケティングを行う際に企業がとるべき戦略が異なることを指摘している. しかしながら, ネットワーク構造の違いが結果に与える影響を詳細に分析することは目的としていないため, それぞれのネットワークの統計的指標の特徴と結果を結びつけた十分な考察がなく, 現実のネットワークデータとの対応付けも行われていないという点で本研究とは視点が異なる.

一方, 近年になって大規模なコミュニケーションネットワークの実データを対象とする構造分析もさかに行われている. 本研究でデータを用いた電子メールによる通信ネットワーク以外にも, 別の電子メール通信ネットワークの分析 [Ebel 02, Kossinets 06] や, 携帯電話の音声通話および文字メッセージによるコミュニケーションネットワークの大規模な分析が行われている [Palla 07, Onnela 07, Hidalgo 08]. 特に後者では, 実際の携帯電話事業者から提供された 400 万以上の利用者の利用履歴に関する大規模なデータを分析対象としている. 我が国でも, 通信トラフィックのシミュレーションモデルの構築のために, 携帯電話事業者による利用者の通信ログのネットワーク分析事例 [佐々木 05, 秋永 06a] や, それをもとに戦略的な広告手法について考察した研究 [秋永 06b] がある.

このような実際の市場におけるコミュニケーションネットワークの研究事例を, 本研究で提案した人工市場アプローチによる市場ダイナミクスの分析と組み合わせることで, 複雑な市場現象のさらなる理解につながるものと期待される.

6. 結 言

本論文では, 利用者間のコミュニケーションサービスの市場に作用するネットワーク外部性の効果を, 2 種類

の利用者モデル, および利用者間のコミュニケーションの空間構造を複雑ネットワークモデルによってモデル化した人工市場シミュレーションによって分析した. その結果, コミュニケーションネットワークの空間構造によって, 市場に作用するネットワーク外部性の強さに差異が生じることを確認し, 平均次数 (密度) に加え, クラスタ性, 正の次数相関が, 外部性の作用を強める主要な要因となることを指摘した. また, 実際のコミュニケーションネットワークを導入したシミュレーションからは, それらの要因を適切に再現したネットワークモデル (本論文で分析したモデルの中では CNN モデル) によって, 現実起こりうる市場現象をより正確に再現し, 評価が可能となることを示した.

さらに, 2 種類の利用者モデルの違いから, 利用者のミクロレベルのモデリングの違いによる, 市場全体に発現するネットワーク外部性の作用の差異を示した. 特に, 利用者のコミュニケーション量に不均一性を導入したモデル II において, 市場全体の振る舞いに安定相と不安定相の 2 相が発現することを示した. それらは背後のネットワーク構造と乗り換えコストのパラメータ設定に依存し, 特定のパラメータで極大値をとることを示した. これらの知見から, 事業者が利用者の相互作用ネットワークの構造を分析することで, 市場に作用するネットワーク外部性の効果を見積もり, 自社にとって最適なサービス仕様や料金の設定をするための支援となるものと期待できる.

今後, これらの結果を実際のコミュニケーションネットワークデータ, および実際の利用者のサービス利用パターンのモデル等と比較することで, 本論文で行ったシミュレーションの妥当性を検証するとともに, 利用者のネットワーク構造の分析を通じて, マーケティングやサービス効果の向上を図るための一助となる知見について, さらに考察してゆきたいと考えている.

謝 辞

本論文の執筆にあたり, 有意義な議論およびアドバイスをいただいた NTT ドコモ総合研究所の秋永和計氏, 金田茂氏, 佐々木純氏, 山崎憲一氏および NTT 未来ねつと研究所の風間一洋氏に謝意を表する. また, 本研究の一部は科研費 (特別研究員奨励費, 課題番号 20・3782) の助成を受け行った.

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Arthur 90] Arthur, W. B.: Positive feedbacks in the economy, *Scientific American*, Vol. 262, pp. 92 - 99 (1990)
- [Arthur 93] Arthur, W. B. and Lane, D. A.: Information Contagion, *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 4, pp. 81 - 104 (1993)
- [Arthur 96] Arthur, W. B.: Increasing returns and the new world of business, *Harvard Business Review*, Vol. July-Aug., (1996)

- [Barabási 99] Barabási, A.-L. and Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol. 286, pp. 509 – 512 (1999)
- [Boccaletti 06] Boccaletti, S., Latora, Y., Moreno, Y., Chavez, M., and Hwang, D.-U.: Complex networks: Structure and dynamics, *Physics Report*, Vol. 424, pp. 175 – 308 (2006)
- [Church 92] Church, J. and Gandal, N.: Network Effects, Software Provision and Standardization, *The Journal of Industrial Economics*, Vol. 40, No. 1, pp. 85 – 103 (1992)
- [Ebel 02] Ebel, H., Mielsch, L.-I., and Bornholdt, S.: Scale-free topology of e-mail networks, *Physical Review E*, Vol. 66, No. 035103 (2002)
- [Erdős 59] Erdős, P. and Rényi, A.: On random graphs, *Publicationes Mathematicae*, Vol. 6, pp. 290 – 297 (1959)
- [Frels 03] Frels, J. K., Heisler, D., and Geggia, J. A.: Standard-scope: an agent-based model of adoption with incomplete information and network externalities, in *Proceedings of 3rd International Workshop on CIEF*, pp. 1219 – 1222 (2003)
- [Guimerà 03] Guimerà, R., Danon, L., Díaz-Guilera, A., Giral, F., and Arenas, A.: Self-similar community structure in a network of human interactions, *Physical Review E*, Vol. 68, No. 065103 (2003)
- [Hidalgo 08] Hidalgo, C. A. and Rodriguez-Sickert, C.: The dynamics of a mobile phone network, *Physica A*, Vol. 387, pp. 3017 – 3024 (2008)
- [Katz 85] Katz, M. L. and Shapiro, C.: Network Externalities, Competition, and Compatibility, *American Economic Reviews*, Vol. 75, No. 3, pp. 424 – 440 (1985)
- [Katz 92] Katz, M. L. and Shapiro, C.: Product Introduction with Network Externalities, *The Journal of Industrial Economics*, Vol. 40, No. 1, pp. 55 – 83 (1992)
- [Khalak 03] Khalak, A.: Agent-based model for economic impact of free software, *Complexity*, Vol. 8, pp. 45 – 55 (2003)
- [Klemm 02] Klemm, K. and Eguíluz, V. M.: Highly clustered scale-free networks, *Physical Review E*, Vol. 65, No. 036123 (2002)
- [Kossinets 06] Kossinets, G. and Watts, D. J.: Empirical Analysis of an Evolving Social Network, *Science*, Vol. 311, No. 5757, pp. 88 – 90 (2006)
- [Lee 06] Lee, E., Lee, J., and Lee, J.: Reconsideration of the Winner-Take-All Hypothesis: Complex Networks and Local Bias, *Management Science*, Vol. 52, No. 12, pp. 1838 – 1848 (2006)
- [Newman 06] Newman, M. E. J., Barabási, A.-L., and Watts, D. J.: *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton Univ. Press (2006)
- [Onnela 07] Onnela, J.-P., Saramäki, J., Hyvönen, J., Szabó, G., Lazer, D., Kaski, K., Kertész, J., and Barabási, A.-L.: Structure and tie strengths in mobile communication networks, *Proceedings of National Academy of Science*, Vol. 104, pp. 7332 – 7336 (2007)
- [Palla 07] Palla, G., Barabási, A.-L., and Vicsek, T.: Quantifying social group evolution, *Nature*, Vol. 446, pp. 664 – 667 (2007)
- [Phan 03] Phan, D., Pajot, S., and Nadal, J. P.: The monopolist's market with discrete choices and network externality revisited: small-worlds, phase transition and avalanches in an ACE framework, in *Proceedings of the Ninth annual meeting of the Society of Computational Economics* (2003)
- [Vázquez 03] Vázquez, A.: Growing network with local rules: Preferential attachment, clustering hierarchy, and degree correlations, *Physical Review E*, Vol. 67, No. 056104 (2003)
- [Watts 98] Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Vol. 393, pp. 440 – 442 (1998)
- [Weitzel 02] Weitzel, T., Wendt, O., and Westarp, F.: Reconsidering network effect theory, in *Proceedings of the 8th European Conference of Information Systems*, pp. 484 – 491 (2002)
- [Wendt 00] Wendt, O. and Westarp, F.: Determinants of Diffusion in Network Effect Markets, in *SFB 403 Research Report* (2000)
- [秋永 06a] 秋永 和計, 金田 茂, 井原 武, 品川 準輝, 三浦 章: モバイルネットワークシミュレーションのためのユーザ情報通信モデルの提案, 電子情報通信学会技術研究報告, NS, ネットワークシステム, Vol. 105, No. 627, pp. 197–200 (2006)
- [秋永 06b] 秋永 和計, 佐々木 純, 井原 武, 品川 準輝, 三浦 章: コミュニケーションサービスにおける戦略的広告方法の提案, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. 2, p. 260 (2006)
- [和泉 03] 和泉 潔: 人工市場 - 市場分析の複雑系アプローチ-, 森北出版 (2003)
- [井庭 01] 井庭 崇, 竹中 平蔵, 武藤 佳恭: 人工市場アプローチによる家庭用 VTR の規格競争シミュレーション, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 42, No. SIG14, pp. 73 – 89 (2001)
- [井庭 03] 井庭 崇: 社会・経済シミュレーションの基盤構築 複雑系と進化の理論に向けて, PhD thesis, 慶応義塾大学大学院政策・メディア研究科 (2003)
- [金子 06] 金子 陽平, 西野 成昭: ネットワーク外部性をともなう市場における情報非対称性と購買行動, 情報処理学会論文誌, Vol. 47, No. 5, pp. 1473 – 1482 (2006)
- [川村 05] 川村 秀憲, 大内 東: ネットワーク外部性の働く製品市場のモデル化とプレゼン戦略の評価, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol. 48, pp. 48 – 65 (2005)
- [佐々木 05] 佐々木 純, 秋永 和計, 井原 武: 携帯電話におけるユーザ間ネットワーク構造分析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, No. 2, p. 168 (2005)

〔担当委員: 栗原 聡〕

2008 年 5 月 11 日 受理

著者紹介

内田 誠

東京大学大学院工学系研究科博士課程・日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2006 年東京大学工学系研究科環境海洋工学専攻修士課程修了。同年東京大学人工物工学研究センター学術研究支援員を経て, 同年 10 月より現所属。複雑系シミュレーション, 複雑ネットワークの構造およびダイナミクスの分析・可視化に関する研究に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会会員。

白山 晋 (正会員)

1982 年京都大学工学部航空工学科卒業。1987 年東京大学工学系航空学専攻博士課程修了。(株) 計算流体力学研究所などを経て, 1999 年東京大学工学系研究科環境海洋工学専攻助教授。2002 年, 同大学人工物工学研究センター助教授。2007 年同准教授, 現在に至る。工学博士。主として, 複雑ネットワーク分析, 可視化情報に関する研究に従事。