

マルチエージェント・シミュレーションと動的ネットワーク 共同体と共同体のあいだをめぐって Dynamic Networks on Multi-agent simulation: Constructing Betweenness of Communities

棚 橋 豪
Tanahashi Takeshi

1. はじめに 差異としての商人

商人とは誰か。これまで、商人は売り手と買い手の媒介者として主題化されてきた。商業資本論が想定する商人像は、意図的であるかどうかを問わず、垂直的關係下に限定されている。すなわち、そこでの商人は単一の共同体（市場、システム）内におけるそれであった。

これに対して、石井（2004）は交換の前提にあるような価値体系間の差異にこそ「マーケター」の本領が発揮されると指摘する。これはカール・マルクスの『資本論』に記された有名なフレーズに基づいている。「商品交換は、共同体の果てるところで、共同体が他の共同体またはその成員と接触する点で、始まる（邦訳（1）p.161）」。

共同体と共同体のあいだに注目した、より哲学的考察は柄谷（1978, 2010）に詳しい。彼はマルクス解釈に一つの転換をもたらしている。例えば、剰余価値について、通俗的マルクス経済学の立場では「剰余価値の形成を流通そのものから説明することは不可能（邦訳（1）p.288）」とされるが、それは単一の共同体のみを想定しているからに他ならない。

ところで、この立場は伝統的な経済学的思考と相性が悪い。この着想それ自体が形式化を拒むからである。従来の理論枠組は単一システムを仮定している。共同体と共同体のあいだ、システムとシステムのあいだに関して、単一のシステム論では射程外となるのである。柄谷（2010）は次のように言う。「この「間」は、たんに「差異」としてあり、実体的にあるのではない。それは、けっしてポジティブには語りえず、語られたとたんに見失われる、それ自体超越論的場所である（p.199）」。

本論の関心は、このような哲学的言説をどのようにモデル化するのかという点にある。「あいだ」はシステムの外部に属するということからしても、従来型のシステム論や均衡論ではそれらを積極的に語ることはできない。そこで、まず社会ネットワーク論、複雑ネットワーク、マルチエージェント・シミュレーションの批判的検討を通じて、モデル構築の道具立てを図りたい。

2. 既存研究と本論の関係について

2.1. ネットワーク論について

ネットワーク論の起源や発展過程についてはFreeman（2004）に詳しい。その広がりには物理学、社会学、計算機科学が織りなす学際的なものである。市場科学への応用例は、代表的なものに、経営学サイドからの撰取として

Iacobucci (1996)、陶山 (2002)、若林 (2006, 2009) などがあり、また工学サイドからの展開として小林 (2008) が貨幣生成シミュレーションを行っている。

ネットワーク理論が扱う主題やその方法は多岐に渡るが、その根本において共通する特徴がある。それは、ネットワーク構造のマクロ的側面が重視されるという点である。すなわち、アクターやエージェント（頂点）とそれらの紐帯（辺）が織りなす隣接行列の解析に従事することになる。

例えば、若林 (2006) のように、企業間関係の構造に関して実証研究としての成果が見られるが、その一方で「なぜそのようなネットワーク構造に至ったのか」、「そしてその後、どのように変化するのか」といったネットワークのダイナミクスは説明できない。あくまでもスナップショットとしての全体＝マクロ的側面にのみ焦点が当てられ、個々のアクターやエージェントの行為には言及できない。ここにネットワーク論の限界の一つがある。

もちろん、周知のように Watts (2003) の「スモールワールド・ネットワーク」や Barabási (2002) の「スケールフリー・ネットワーク」のように、頂点や辺の構造が変化するモデルも存在する。

ただし、これらはその研究目的からしても、ネットワーク構造の変化自体を指向したものではなく、次数分布がべき分布に収束するか否かという点に関心がある。それらもやはり、結果としてのマクロ構造に定位している。彼らの理論では、確かにネットワークは変化するものの、しかしその変化と個々の頂点の行動ルールの関連は考慮されていない。

例えば、あえてバラバシの意図を超えて、スケールフリー・ネットワークを批判的に検討するならば、次のような議論の余地が残されているだろう。

- ・なぜ新規参入者はネットワーク全体を見渡せるのか？
- ・なぜ「ハブ」は次数中心性のみで定義されるのか？
- ・紐帯（辺）が接続されていくのみで、なぜ切断されないのか？
- ・その切断条件は何でありうるのか？

以上の論点は、ネットワーク論やグラフ理論には事実上、空間が存在しないことと関連がある。グラフ理論は、ケーニヒスベルクの橋問題に象徴されるように、地理的な意味での空間に囚われずに頂点と辺のみで構成するところに最大のメリットがある。幾何的なグラフはあくまでも、理解を助けるための補助的イメージでしかなく、モデルとは独立の見かけ上の位置情報が与えられているにすぎない。

ゆえに、そこには個々のエージェントの意志を反映して移動できる物理的空間が存在しない。Axtell (2000) は、社会ネットワークでは位置情報を持った空間グラフ (spatial network) の方が、モデルとして自然であると主張している。このような空間が想定されて初めて、先に挙げた問題に取り組むことができるだろう。例えば、「全体を見渡せないように視野を局所的に限定する」といったように。

以上に見たように、ネットワーク論には、時間と空間が事実上存在しない。本論は、その補填をマルチエージェント・シミュレーションに求める。

2.2. マルチエージェント・シミュレーションについて

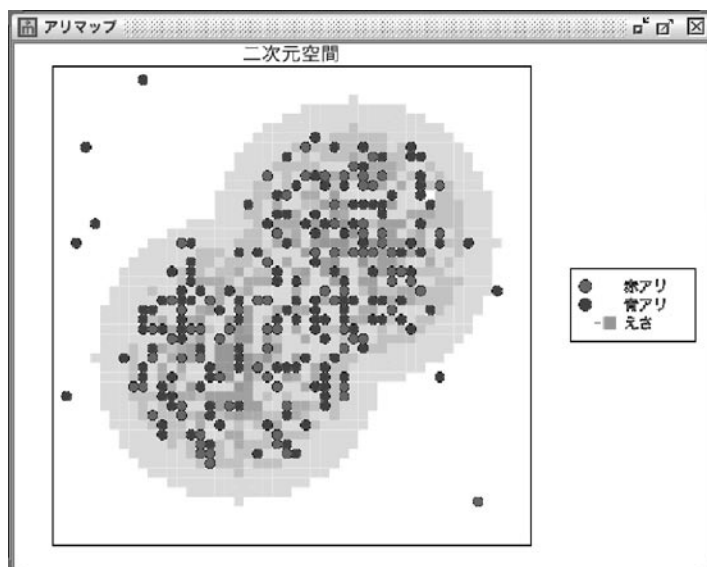
ネットワーク理論では、マクロ的側面が重視されるのに対して、マルチエージェント・シミュレーションは「ボトムアップ」アプローチが採用され、ミクロ的側面が重視される。各エージェント間の相互作用、そしてその総体としての集合行動を観察するのである。

その代表例として、Epstein and Axtell (1996) のシュガースケープ・モデルを紹介する¹⁾。

このモデルでは赤と青のアリが「砂糖の山」上で相互作用している。セルオートマトンから派生したマルチエージェント・シミュレーションは、二次元空間上を個々のエージェントが移動していく。もちろん、そこでのパラメータは位置情報だけでなく、出生、死亡、交配、代謝、視覚などの変数を変化させることによって、仮定の箱庭内でパラメータ変更による実験が可能となる。

ところで、ミクロ的な側面を重要視する場合、その総体としてのマクロ的側面との関係を軽視してしまう傾向がある。例えば、このシュガースケープ・モデルの場合、アリの行動を決定づける砂糖の分布自体は変動しない。また「季節変動」もモデルの観察者が天下りの的に変更するだけである。

図 1



また、Epstein and Axtell (1996) では、このモデルを拡張して、近傍のエージェントと関係構築を図る社会ネットワークモデルを考案している。しかし、そのネットワークは次ステップのエージェントの行動に何ら影響を及ぼさない。結局、それは単なる視覚的演出の域を出ていない。

新古典派経済学に代表されるトップダウン型の均衡論に対して、マルチエージェント・シミュレーションは個々のエージェントの相互作用が織りなす「ボトムアップ・アプローチ」を標榜する。ただし、従来理論への批判とは裏腹に、今度はマクロ的側面が弱くなる。「砂糖の山」のアリたちはひたすら局所を這い回る。彼らは「全体」を意識することはない。各アリは局所に定位しながらも、彼らなりの「全体」を思い描くことはないのだろうか？アリが社会を意識するかどうかは脇に置くとしても、人間社会を想定するモデルならば論を待たないだろう。

1) 図は artisoc に移植されたものを使用。「MAS コミュニティ」 <http://mas.kke.co.jp/modules/mydownloads/>

2.3. ミクロ・マクロ・ループの構築

これまでの考察を纏める。ネットワーク論とマルチエージェント・シミュレーション (MAS) を、それぞれマクロ的側面重視/ミクロ的側面重視として対比した。その特徴は以下に表される。

表1

| | ネットワーク論 | MAS | 本論のモデル |
|--------|---------------|---------------|--|
| 特徴 | マクロ トップダウン | ミクロ ボトムアップ | ミクロ・マクロ・ループ |
| ソフトウェア | pajek | artisoc | artisoc |
| 空間 | × | ○ | ○ 二つの「距離」をモデル化 |
| 時間 | × | △ | ○ 定常状態からの逸脱としての時間 |
| グラフ解析 | ○ | × | ○ 媒介中心性 次数中心性 媒介中心性と次数中心性中の 相関 |

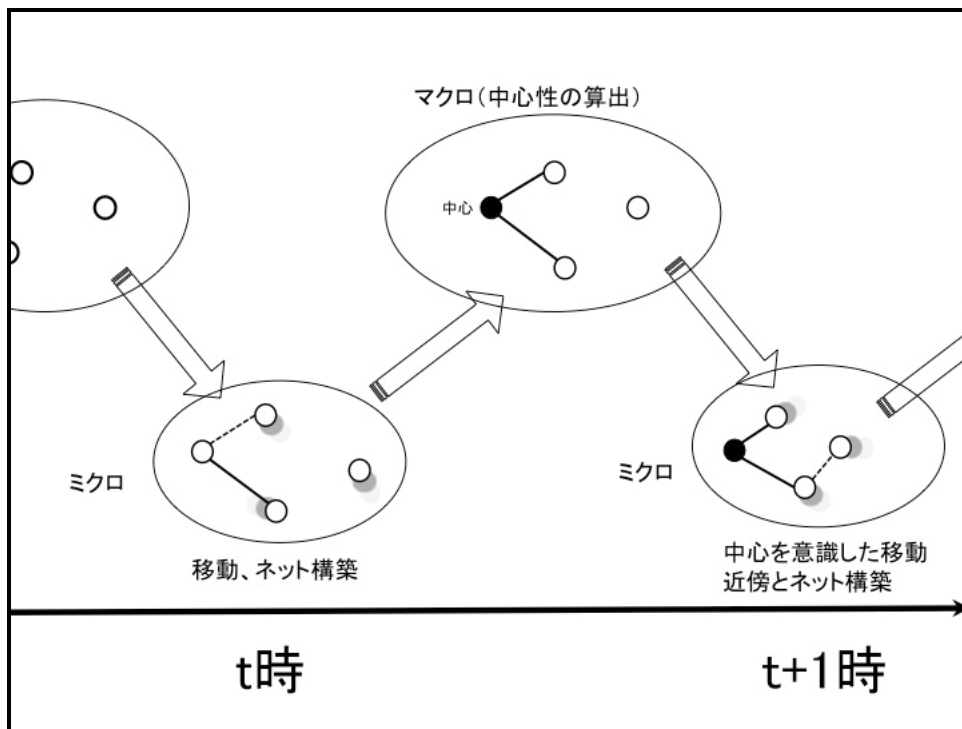
この表にあるように、双方には一長一短があり、両者の欠点をお互いの利点で補う必要がある。後で述べるように、本モデルは実質的には artisoc 上に次数中心性と媒介中心性を求めるグラフ解析アルゴリズムを実装したものとなる。これにより、ネットワーク論的な関係と物理的な関係の両方を扱うことが可能になる。

表内の項目「空間」に関して補足しておく。「距離」には二つの意味合いが存在している。一般的に、物理的に近い存在は関係も親密であるという先入観があるが、例えば「遠距離恋愛」などはその乖離として距離の二重性が露わになる。本論が目論むモデルは、ネットワーク論とマルチエージェント・シミュレーションを統合することにより、二つの距離を明示的に扱うことを可能にしている。

次に、「時間」について補足する。なぜ表内の MAS の時間は△なのか。この点について説明する。artisoc では、ソフトウェア自体に step という単位で時間が組み込まれている。これは artisoc で構築したモデルはすべからく時間が存在することを意味する。極言しよう。artisoc では最初から定常状態にあるような変化のないモデルすら step は刻々と進行していることになる。言うまでもなく、このようなものを「時間」と見なすわけにはいかない。したがって、artisoc を使用しながらも、時間をより限定的に定義する必要がある。

そこで、本論は時間を次のような特徴を有するものとして扱う。単なるエージェント間の相互作用ではない、ミクロとマクロの相互作用としてのダイナミクス=時間である。そのライトモチーフを下図に示す。

図 2



t時において、各エージェントが空間上で近傍の相手と紐帯を結び、その総体としてネットワークが出現する。ここで、マクロレベルにおいてグラフ解析から中心性の最も高いエージェントがリーダーとして選出される。そして、t+1時において各エージェントは以前に選出されたリーダーを空間的に意識した行動をとることになる。例えば、リーダーからの距離が一定以上離れると、方向転換をする。また、距離が離れると紐帯が切断されていく、などが挙げられる。これらの結果、ネットワークは過去とは異なる構造となり、中心性の演算にも影響を及ぼすのである。

2.4. 共同体の構築

本論は、共同体と共同体のあいだの形式化が最終目標になるが、その前提として、まず単一の共同体を構成する必要がある。それは、抽象的な連結グラフが、空間的にもある程度クラスター化している状態である。

各ネットワーク内のリーダー (ID0, ID1) が存在するとしよう。このリーダーに空間的な求心力を与える。土星のリングのように、リーダーを基点とした同心円状のゾーンが方向転換ポイントとなる。クラスター内の各エージェントがこれに到達した場合、一定確率でリーダーの方向へ方向転換する。また、下の方のクラスターで、ID10がサークルの外部にあるが、このエージェントは紐帯が切断されていくことになる。また、右上に孤立しているエージェント ID3 は、リーダーがないのでランダムウォークの状態にある。

図3



2.5. 共同体と共同体のあいだの構築

リーダーは、媒介中心性と次数中心性を計算して、最も中心性が高い者が選出される。一般に共同体が安定している場合、リーダーは次数中心性と媒介中心性の両方を兼ねている。ただし、もし二つのクラスターが接続された時、二つの中心性は乖離する傾向にある。

媒介中心性は、以前にクラスターの縁にいたエージェントが高くなる。二つの中心性が乖離した場合、本論のモデルでは媒介中心性をリーダーと見なすようにしている。この理由は、マルクスが交換過程論でみた商人の特徴は、次数中心性よりも媒介中心性に見出すことができるからである。

媒介中心性の特徴について、あえて卑近な例を挙げておく。同程度の生徒数の男子校と女子校があるとする。その時、唯一男子校生 X だけが女子校にアクセスできるコネをもっていたとする。X は男子校内で友達が少ないが(次数中心性が低い)、二つのコミュニティの媒介者として桁違いの中心性を発揮することになるだろう。

「共同体が他の共同体またはその成員と接触する点」は、クラスターの果てに位置することにより、「次数中心性は低いが媒介中心性が高い」エージェントによって構成される。ここで共同体と共同体のあいだを媒介する商人は、Granovetter (1973) の「弱い紐帯の強さ」にある。次数中心性と媒介中心性を一人のエージェントが担わずに、二つが乖離するような条件こそ、マルクスが言わんとした商人の存立根拠に対応する。

もっとも、この中心性は永続的なものではない。商人は自らが規定した動態のなかでその存在価値を失っていく。彼らはシステムの動態を生み出すと同時にその中に消えていく「消失する媒介者」(大澤 2004) である。以上が本論が目論むライトモチーフである。以下、より詳細なモデルの説明とこれを用いた実験を行う。

3. モデル詳細

3.1. 設定

空間サイズ：80 × 80

エージェント数：100

3.2. エージェント・ルール

artisoc における「エージェント・ルール」は以下のルールを各エージェント（本モデルでは 100 人）が各ステップ内で全員行う。ステップ内でのルール実行順序はランダムである。

3.3. リーダーとの関係

- ・ 方向転換ゾーンを二重に設けている。
- ・ リーダーとの距離 x が $(9 < x < 10)$, $(16 < x < 17)$ にある場合、20%の確率でリーダーの方向に向く。
- ・ リーダーとの距離が 25 以上の場所にあるとき、30%の確率で自身の紐帯の一つを切断する。

3.4. 移動

- ・ ステップ毎に -20 度 ~20 度の範囲で方向転換
- ・ 移動スピード 0.2

3.5. 紐帯構築

- ・ 視野 X のなかで他エージェントがいる場合、視野の中で最も次数の高い相手と紐帯を結ぶ。
- ・ 関係構築する相手の選択は、すでに紐帯を結んでいる相手もその対象となる。その場合、「新たな紐帯は結ばれず現状の関係を維持」を意味する。

3.6. 紐帯切断

- ・ すでに紐帯を結んだ他のエージェントの中で、すでに視野 Y ($X > Y$) より離れた者の紐帯をすべからく切断する。

3.7. ユニバース・ルール

artisoc における「ユニバース・ルール」は、各ステップのエージェント・ルールの前後にある。本モデルではユニバース・エンドにおいて、すなわち 100 人のエージェント・ルールが遂行された後に、クラスターの管理（各エージェントがどのクラスターに属しているのか）、次数中心性、媒介中心性、そしてこの二つの中心性の相関係数を求めている。

その中心性の組み合わせは最大 3 種類考えられるが、これらの色分けするアルゴリズムもここに実装している。各中心性とカラーの対応関係を以下に記す。

- ・ 次数中心性が最大の者：青
- ・ 媒介中心性が最大の者：赤
- ・ その両方を兼ねる者：黄色

媒介中心性の計算はかなりの負荷がかかる。これを効率的な演算アルゴリズムは Brandes (2001) を参考にして

いる。本モデルはこのアルゴリズムにクラスター管理を加えた上で、ステップ終了毎に再計算している。クラスター管理が必要なのは、あくまでも求める情報は各非連結グラフ内における最大の中心性だからである。仮に近くにリーダーがいたとしても、このエージェントが属さない共同体のリーダーならば、このエージェントにとって彼はリーダーではない。

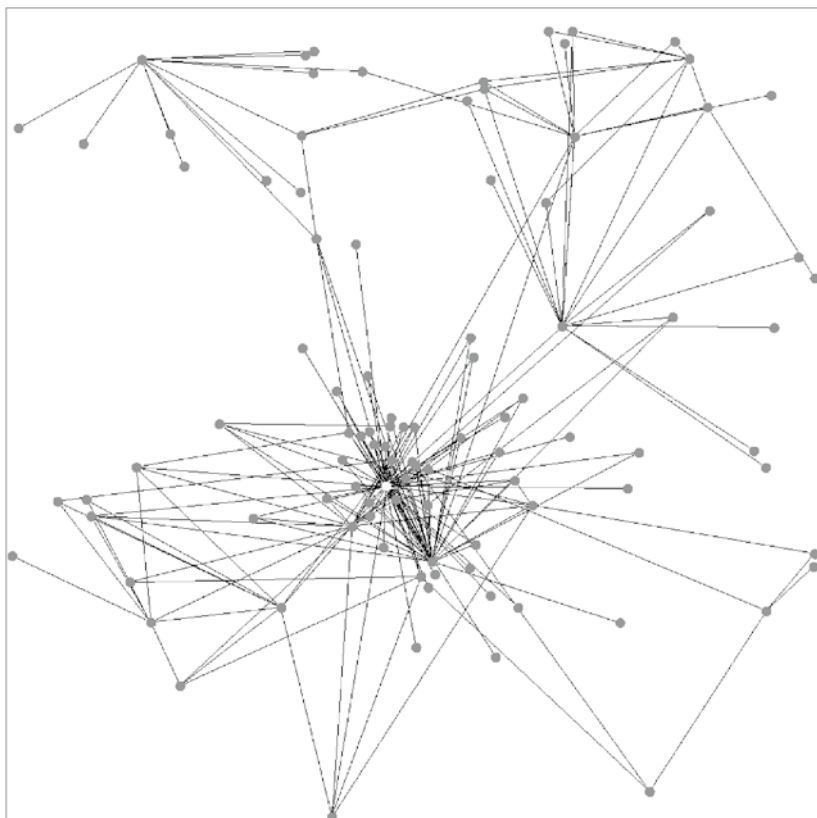
4. 研究結果と考察

4.1. 視野を変更した場合の比較

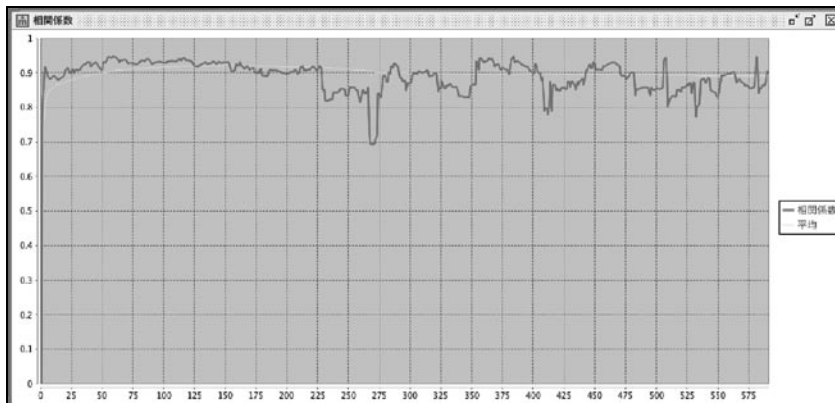
他のパラメータをすべて一定にして、各エージェントの紐帯構築可能な視野を変化させてみよう。以下では視野 25 の場合と視野 8 の場合を比較した。

視野 25 の場合、安定的な一つの連結グラフが出現し、次数中心性と媒介中心性の相関係数は安定的な正の相関にある。

視野 25 ネットワーク構造 (step:591)

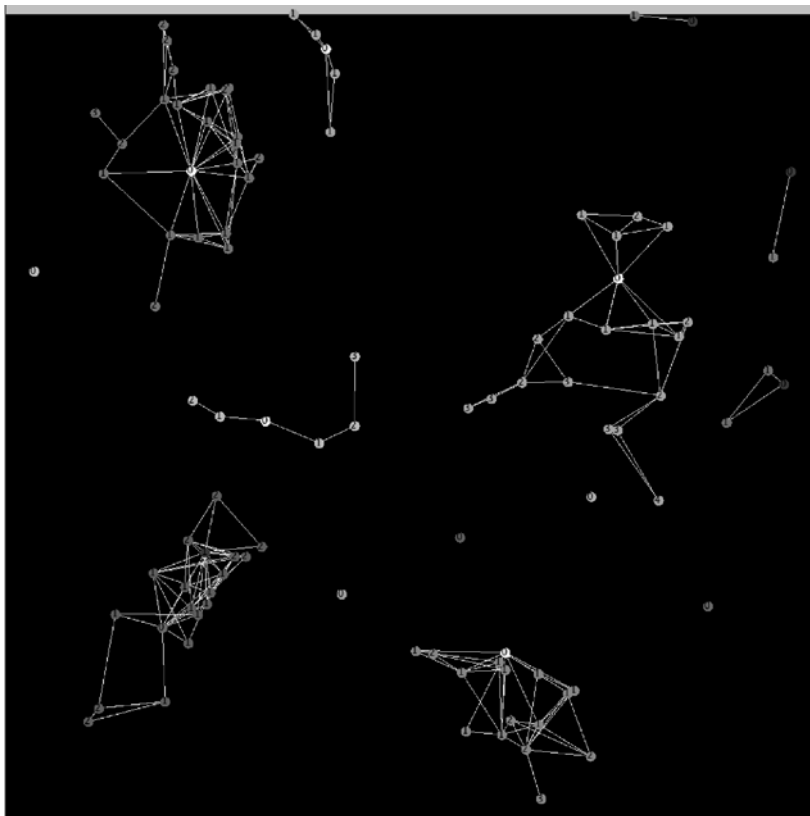


視野 25 媒介中心性と次数中心性の相関係数（時系列上の変化）

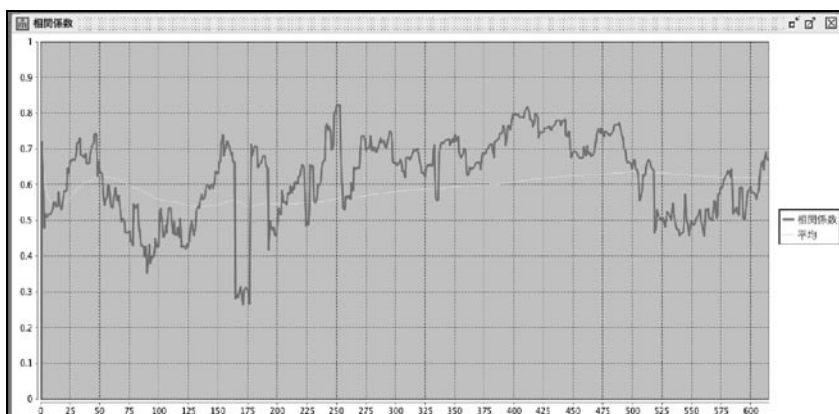


他方、視野 6 の場合では、ネットワーク構造は安定せず、常に数個のクラスターが流動的に形成される。また二つの中心性の相関係数は振れ幅が大きくなる。

視野 6 ネットワーク構造 (step:615)



視野 6 媒介中心性と次数中心性の相関係数（時系列上の変化）



4.2. 視野 6 における時系列上の変化について

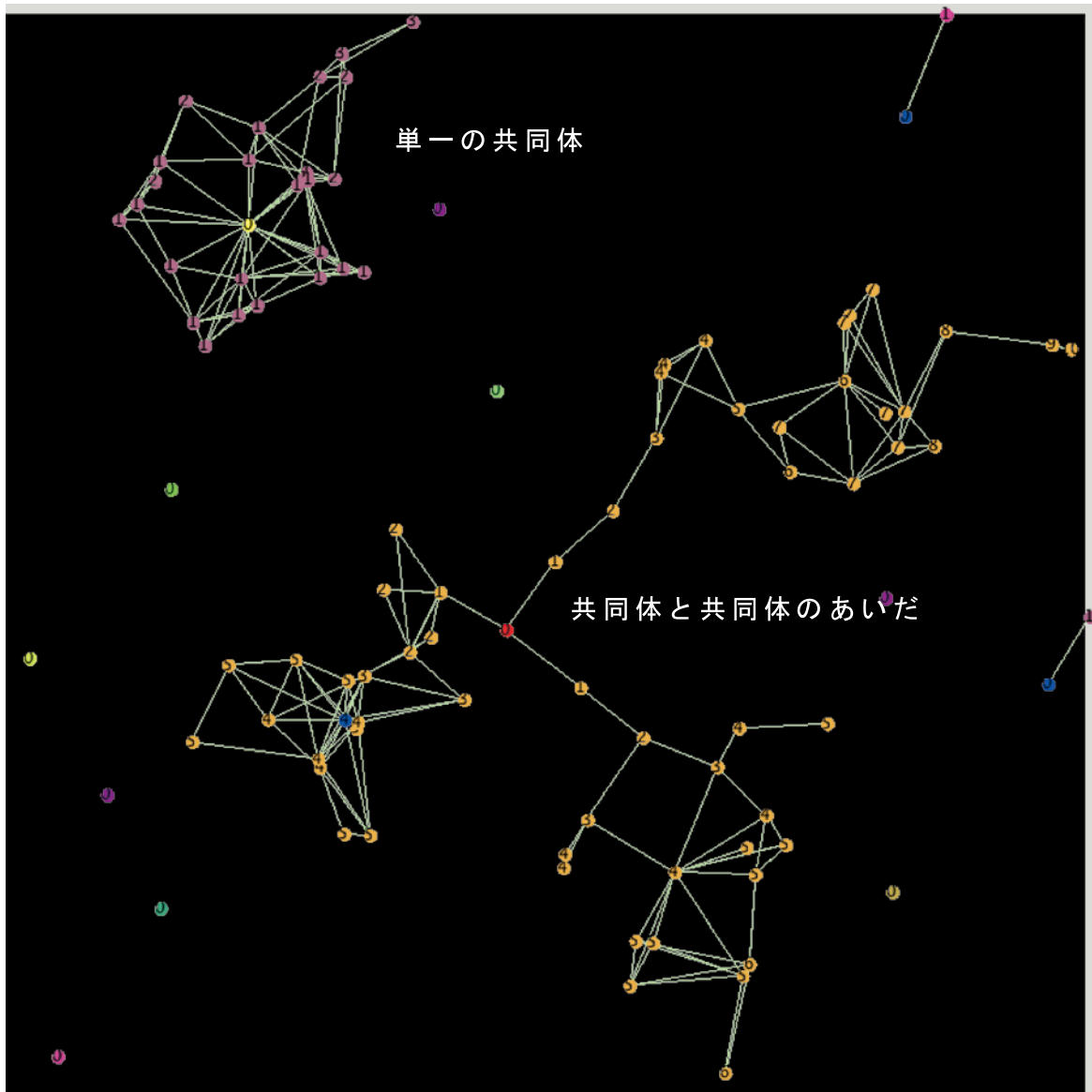
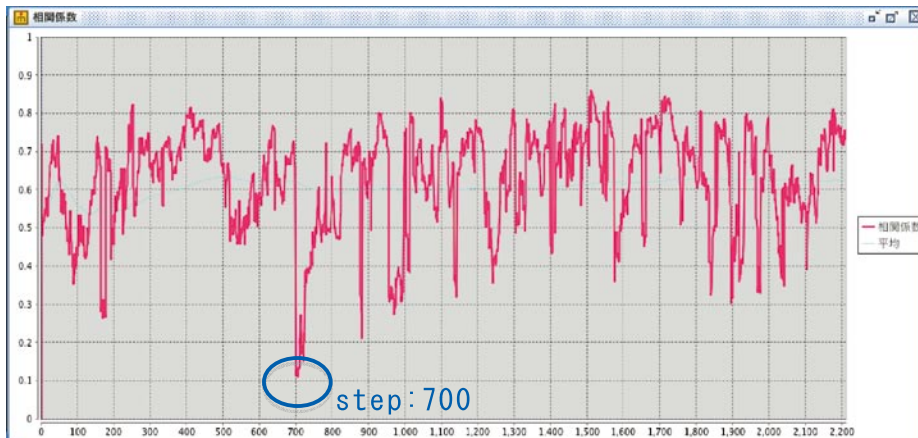
各エージェントの視野が広い場合、ネットワークは単一のハブ構造に近くなり、次数中心性と媒介中心性の相関係数は、強い正の相関で安定する。

他方、視野が限定されると、遠くに離れた次数中心性の高い者とは紐帯を結ばず、近隣の者と関係を結ぶことを余儀なくされる。これが、クラスターのいくつかの島を作る要因となっている。その過程で、ある程度の規模同士のクラスターがその縁で接触するとき、次数中心性は低いが媒介中心性が高いエージェントが出現する。そして、これが安定的な共同体を脅かす錯乱要因となっている。これは二つの中心性の相関係数が大きく落ち込んだときに顕著である。

見方を変えれば、各エージェントの限定された視野によって、他の共同体を発見できないなかで、「弱い紐帯の強さ」にある媒介者が彼らに代わって他の共同体とのブリッジの役割を果たしていることになる。その後、このことによってメンバーの行動が変化していく。そして、新たなネットワークの形成過程において、彼の媒介中心性は相対的に低下し、ブリッジ・リーダーとしての立ち位置は失われていく。このアニメーションをカラー図に記す。

「消滅する媒介者」のプロトヒストリーは、まさにこれが持つ存在論的特性により、主題化されることはなかった。既存の市場科学のモデルは事後的・静態的なものである。そこでは既に消えてしまった媒介者の痕跡を追認することはできない。共同体と共同体のあいだにあることの科学は、まだまだ海図なき航海に例えられる。しかしながら、本論のマルチエージェント・シミュレーション上で展開されたネットワーク論は、その前途多難な探求に一筋の光明を与えるだろう。

視野 6 相関係数 (step:0-2200, ネットワークは step:700)



5. 本論の意義と今後の展開

5.1. 方法論上の意義

本論の意義は、まず方法論として、従来のネットワーク論とマルチエージェント・シミュレーションを統合したという点が挙げられる。

実質的な作業は媒介中心性の artisoc 上への実装である。これにより変化していくネットワークの媒介中心性をリアルタイムに演算可能となった。また、この演算過程において、クラスター ID の管理やカラーリングを行うアレンジをしている。

また、先に見た「方向転換ゾーン」のように、ネットワーク上のクラスターと物理空間的な意味でのクラスターを対応させるルールを考案した。

5.2. 理論上の意義

理論的、概念的な貢献としては、従来の商人像が垂直的關係下におけるものだったのに対して、本論はいわゆる「冒険商人」のモデルを構築した。これは単に中世の商業資本主義の問題に留まらず、現代のカテゴリーキラー的な商人や業態イノベーションの起源とも深い関連がある。そこで見られる商人は、製造業者の単なる販売チャネルではなく、様々な情報網のあいだをネットワーク化する「あいだ」に立つ者達である。一般に、彼らは単一のクラスター内における主人公ではない。共同体の際にあるがゆえに、共同体と共同体のあいだに立つ権利を有している。

また、「弱い紐帯の強さ」は社会ネットワーク論の鍵概念であるが、特にその厳密な定義はなされてこなかった。近年ではダンカン・ワッツが「スモールワールド」内のショートカットを形成する者としてこれを定式化している。しかし、この定義では「なぜ他にもない彼がショートカットを形成し得たのか」という点が判然としない。また、紐帯の「弱さ」と「強さ」がネットワーク論の概念の何に対応するのかも不明瞭である。これに対して本論の立場は、「弱い紐帯の強さ」をワールド間ネットワークと見なす。そして、「弱さ」とは次数中心性の低さとして、また「強さ」とは媒介中心性の高さとして対応づけた。こちらの方がオリジナルのグラノヴェッターの定義に近いように思われる。

以上に見たように、本論が提示したモデルは、商人像の相対化ならびに社会学理論の形式化について再考を迫るものである。

5.3. 課題

マルチエージェント・シミュレーションはまだまだ過渡期であり、方法論的には完全に確立されたものではない。本論も例外ではなく、モデルの検証方法も含めて再考の余地があるだろう。

より具体的な方向性として、クラスター形成ルールに関するものがある。このルールは他の形成手法があり得るだろう。例えば、リーダーからのネットワーク論的な意味における距離を、物理的な距離において同心円状に対応させるルールなどが考えられる。これらについては項を改めて論じることにはしたい。

参考文献

- Axtell, R. (2000) "Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences," *CSED Working Paper*, No.17.
- Barabási, A. -L., (2002) *Linked*, Plume. (青木薫訳『新ネットワーク思考－世界のしくみを読み解く』NHK 出版, 2002) .
- Brandes, U. (2001) "A Faster Algorithm for Betweenness Centrality," *Journal of Mathematical Sociology*, Vol.25, No.2, pp.163-177.
- Curtin, P. D. (1984) *Cross-Cultural Trade in World History*, *Cambridge University Press*. (田村愛理・中堂幸政・山影進訳『異文化間交易の歴史』NTT 出版, 2005) .
- Epstein, J. and Axtell, R. (1996) *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT press. (服部正太・木村香代子訳『人工社会－複雑系とマルチエージェント・シミュレーション』, 1999) .
- Freeman, L.C. (1979) "Centrality in Social Networks Conceptual Clarification," *Social Networks*, Vol.1, No.3, pp.215-239.
- Freeman, L.C. (2004) *The Development of Social Network Analysis: A Study in the Sociology of Science*, Empirical Press. (辻竜平訳『社会ネットワーク分析の発展』NTT 出版, 2007) .
- Girvan, M. and Newman, M. E. J. (2002) "Community Structure in Social and Biological Networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.99, No.12, pp.7821-7826.
- Granovetter, M. S. (1973) "The strength of weak ties," *American Journal of Sociology*, Vol.78, No.6, pp.1360-1380. (野沢慎司編・監訳『リーディングスネットワーク論』勁草書房, 2006 に所収「弱い紐帯の強さ」) .
- Iacobucci, D., ed. (1996) *Networks in Marketing*, Sage.
- Marx, K. (1867/73/85/94) *Das Kapital*, I - III , MEW, Band 23-25, 1962, Dietz Verlag. (岡崎次郎訳『資本論(1)～(9)』国民文庫, 1972) .
- Watts, D. J. (2003) *Six Degrees: The Science of a Connected Age*, W W North & Co Inc. (辻竜平・友知政樹訳『スモールワールド・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) .
- 石井淳蔵 (2004) 『マーケティングの神話』岩波現代文庫.
- 石井淳蔵 (2005) 「商人の存在根拠再考－ケースと理論」『神戸大学研究科モノグラフ』No.0855.
- 大澤真幸 (2004) 『性愛と資本主義』青土社.
- 柄谷行人 (1978) 『マルクスその可能性の中心』講談社.
- 柄谷行人 (2010) 『トランスクリティーク』岩波現代文庫.
- 北中英明 (2005) 『複雑系マーケティング入門』共立出版.
- 小林正人他 (2008) 「複雑2重ネットワークモデルによる貨幣創発のエージェントシミュレーション」『コンピュータソフトウェア』Vol.25, No.4, pp.261-268.
- 陶山計介他編 (2002) 『マーケティング・ネットワーク論』有斐閣.
- 棚橋豪 (2007) 「風呂チャネル論の再検討－二つの商人像とその混同」『産業と経済』Vol.22, No.2, pp.37-55.
- 増田直紀・今野紀雄 (2010) 『複雑ネットワーク－基礎から応用まで』近代科学社.

松尾豊他（2006）「中心性に着目した合理エージェントのネットワーク形成」『人工知能学会論文誌』 Vol.21, No.1, pp.122-132.

山影進（2007）『人工社会構築指南－artisocによるマルチエージェント・シミュレーション入門』書籍工房早山.

若林直樹（2006）『日本企業の新しい経済社会学的分析－企業間関係の新しい経済社会学的分析』有斐閣.

若林直樹（2009）『ネットワーク組織－社会ネットワーク論からの新たな組織像』有斐閣.