

複雑2重ネットワークモデルによる貨幣の創発について

On emergence of money in a complex doubly structural network model

國上真章^{*1}
Masaaki Kunigami

小林正人^{*2}
Masato Kobayashi

山寺智^{*2}
Satoshi Yamadera

寺野隆雄^{*2}
Takao Terano

^{*1} 筑波大学大学院ビジネス科学研究科
Graduate School of Business Science
University of Tsukuba

^{*2} 東京工業大学大学院知能システム科学専攻
Computational Intelligence and Systems Science
Tokyo Institute of Technology

We are conducting the research on the emergence of the money from the barter economy. This paper presents a new model, which consists of a micro-macro doubly structural network reflecting individual recognitions and social connections among agents. This model will show processes in which particular one of goods attains natures of money as a self-organization of the network. We examine this process by mean-field approximation of dynamics and agent-based simulation.

1. はじめに

実用的な価値を有しない財でも、一旦「貨幣」としての地位を獲得すると、ほとんど唯一の交換手段として市場経済における極めて重要な役割を果たす。物々交換から貨幣による交換が創発するメカニズムについて探求することは、貨幣経済の歴史についてのみならず、地域通貨・電子通貨の成立についても重要な知見を与えると期待できる。

貨幣の役割とその発生の謎については古くからメンガー、ポランニー、岩井等多くの経済学者により考察されているが、近年は数理モデルによる研究 ([Kiyotaki 1989], [Wright 1995], [Luo 1999], [Starr 2003] 等)のほかに、エージェントベースシミュレーション(ABS)による研究 ([Yasutomi 1995], [安富 2000], [Shinohara 2001], [Yamadera 2005], [山寺 2005])も行われている。一方、主体間の社会的な繋がり方に関して、複雑なネットワークの性質 ([Watts 1998], [Barabási 1999]をはじめ多数)に注目した研究が急速に進展して ([Newman (2003)]による総説など)いる。また[Matsuyama 2007]は、コンテンツ間のリンクと主体の社会的繋がりという異なる2つの構造を持つ複雑ネットワークを扱っている。

本研究は、ある財が貨幣的性質を獲得してゆく現象を説明する新しいモデルを提案する。このモデルは、ミクロな個々のエージェント内部における財と財の交換可能性についての認識ネットワークと、エージェント間の繋がりを反映する社会的ネットワークにおけるエージェント間のコンタクトプロセスからなる。ある財が貨幣的性質(一般受容性)をマクロレベルで獲得する様子はネットワークの自己組織化現象として表現され、これを平均場近似による力学系と、エージェントベースシミュレーションという2つの異なるアプローチにより解析できることを示す。

2. モデル

2.1 2重ネットワーク

我々のモデルは、社会ネットワーク上におけるエージェント間のコンタクトプロセスである。ただし、通常のコンタクトプロセスと異なり接触によって状態変化を起こすエージェントの変数自体もまたネットワークになっており、全体として2重に階層化された

ネットワーク構造を持っている。(図1) ここでエージェント間ネットワークは、エージェント(添字: i, j で表示, 全 N 人)同士の経済・社会的な「付き合い」のトポロジーを反映し、所与のものとする。エージェント間ネットワークは動的に変化するものとしても差し支えないが、本論文の範囲では一定のものとする。

一方エージェント内のネットワークは、財と財(添字: α, β, γ で表示, 全 M 種類)の交換可能性に関する当該エージェントの個人的認識を示し、その隣接行列要素は、エージェント i が、「 α と β が交換可能」という認識を持つとき $(\alpha, \beta)_i=1$, 持たないとき $(\alpha, \beta)_i=0$ とする。このエージェント内ネットワークが、エージェント間の付き合いを通して相互に学習され変化されるものとする。

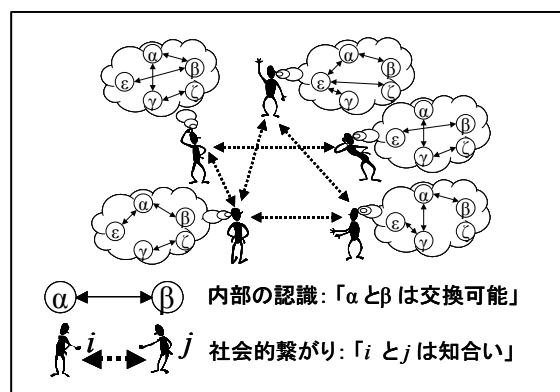


図1:2重ネットワーク

2.2 貨幣の創発とは

経済学では通常、貨幣を(I)計算単位/価値尺度, (II)支払い/流通手段, (III)価値の貯蔵手段, の3つの機能に基づいて定義 ([Hicks 1967], [都留 1994]等)する。本研究では、このうち(I)及び特に(II)の本質的な条件となる一般受容性(ある財が一般受容性を持つとは、それが「誰とでも、何とでも交換できる」こと)をもって「貨幣的性質」とし、ある財が一般受容性を獲得した唯一の財となること、によって「貨幣の創発」とする。

ある財 α が貨幣として創発した状態は、2重ネットワークモデル上では、殆どのエージェント内ネットワークが、 α をハブ・ノード(他の殆どのノードと連結しているノード)とするスター状ネットワークになるよう自己組織化されることを意味する。(図2)(一般受容性がスター状ネットワークで表現できることは[Starr 2003]が示しているが、我々のモデルでは2重構造を用いることにより、「何

とでも交換できる」という性質が「誰とでも」共有されてゆくプロセスを社会的ネットワークの形質に関連させて取扱うことができる)

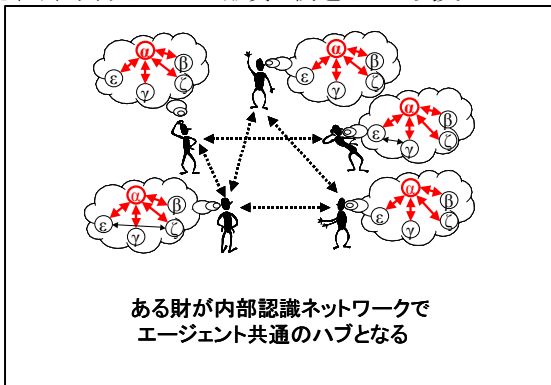


図2:貨幣の創発～自己組織化

2.3 相互作用

我々の2重ネットワークモデルにおいては、エージェントは以下の相互作用(取引及び学習)を行うものとする。

取引: 社会ネットワーク上で隣接するエージェント i と j は、交換可能の認識が一致する($(\alpha, \beta)_i = (\alpha, \beta)_j = 1$)ならば 取引を行い、確率 P_E で双方に利得が発生する。

学習: エージェントは以下の仕組みで相互に学習する。

- 模倣 (Imitate): エージェント i が α, β の取引で利得を得たとき、隣接する i' で $(\alpha, \beta)_{i'} = 0$ ならば、確率 P_I で $(\alpha, \beta)_{i'} = 1$ にする。
- 刈込み (Trim): エージェント i が $(\alpha, \beta)_i = (\beta, \gamma)_i = (\gamma, \alpha)_i = 1$ のとき、 $(\alpha, \beta)_i, (\beta, \gamma)_i, (\gamma, \alpha)_i$ のどれかひとつを確率 P_T で 0 にする。(循環の解消は、エージェントの思考を節約するとともに、[Kiyotaki 1989]とも整合的である)
- 想起 (Conceive): エージェント i において $(\alpha, \beta)_i = 0$ のとき、確率 P_C で $(\alpha, \beta)_i = 1$ にする。
- 忘却 (Forgot): エージェント i において $(\alpha, \beta)_i = 1$ のとき、確率 P_F で $(\alpha, \beta)_i = 0$ にする。

貨幣の創発のためには、模倣と刈込みの2つが本質的と考えるが、過早な収束/絶滅及び過剰な初期値依存を防止するため、想起と忘却を付加的に導入している。

3. 平均場力学系における創発シナリオ

我々の2重ネットワークモデルで貨幣が創発するメカニズムについて、平均場近似を用いた簡単な力学系によって解析する。

3.1 平均場力学系

エージェント間の社会的ネットワークの平均次数を k とし、任意のエージェント周囲の状況をエージェント全体の平均値(平均場: mean field)で近似すると以下の平均場力学系を得る。ここで状態変数 $x_{\alpha\beta}(t)$ は、時刻 t における財 α と財 β を交換可能とみなすエージェントの人口比率である(以下誤解の恐れがない時には添え字を省略する場合があります)。

$$\frac{dx_{\alpha\beta}(t)}{dt} = P_C^{(\alpha\beta)} - \left(P_C^{(\alpha\beta)} + P_F^{(\alpha\beta)} + \sum_{\gamma \neq \alpha, \beta} P_T^{(\alpha\beta\gamma)} x_{\alpha\gamma} x_{\beta\gamma} \right) x_{\alpha\beta} + P_E^{(\alpha\beta)} P_I k(k-1) x_{\alpha\beta}^2 - P_E^{(\alpha\beta)} P_I k(k-1) x_{\alpha\beta}^3$$

$$= P_E P_I^{(\alpha\beta)} k(k-1) \Gamma_{\alpha\beta}(x_{\alpha\beta})$$

$$\Gamma_{\alpha\beta}(x_{\alpha\beta}) \equiv b_{\alpha\beta} - a_{\alpha\beta}(\Sigma xx) x_{\alpha\beta} + x_{\alpha\beta}^2 - x_{\alpha\beta}^3$$

$$a_{\alpha\beta}(\Sigma xx) \equiv \frac{P_C^{(\alpha\beta)} + P_F^{(\alpha\beta)} + \sum_{\gamma \neq \alpha, \beta} P_T^{(\alpha\beta\gamma)} x_{\alpha\gamma} x_{\beta\gamma}}{P_E P_I^{(\alpha\beta)} k(k-1)}, \quad b_{\alpha\beta} \equiv \frac{P_C^{(\alpha\beta)}}{P_E P_I^{(\alpha\beta)} k(k-1)}$$

平均場力学系は、各財同士が交換可能であるという認識を持つ人口比率 $x(t)$ の時間変化を表しており、したがって右辺を規格化した関数である $\Gamma(x)$ の正負及び零点の位置が系全体の振舞いを支配することとなる。

$\Gamma(x)$ についての特性として、以下のことが示される。

- $\Gamma(x)$ の零点(1個~3個)は、もし存在するときは必ず区間 $[0, 1]$ 内に存在する。
- $\Gamma(x)$ に零点が3個存在する条件は次のとおり;

$$\frac{9a - 2 - 2\sqrt{(1-3a)^3}}{27} < b < \frac{9a - 2 + 2\sqrt{(1-3a)^3}}{27}$$

3.2 創発シナリオ

この系の定常状態は、平均場力学系の安定均衡解 $\{x | \Gamma(x)=0, \Gamma'(x)<0\}$ によって与えられ、ある財が貨幣として、他の財に比べ交換可能性の認識を広く他のエージェントに受け入れられている状態は、その財の $\Gamma(x)$ の零点が1の近くに、それ以外の $\Gamma(x)$ の零点が0の近くに分離した状態によって表される。

平均場力学系では、各財の性質により初期状態から明らかに均衡点の位置が異なる或いは初期値自体に大きな差がある等の場合以外に、次のような興味深い創発シナリオが存在する。図3に示すように、この創発シナリオにおいては、

(i) 初期状態では、パラメータ及び $\Gamma(x)$ の関数形の差は存在しても顕著なものではなく、 $x(t)$ はみな小さな値から増加する。

(ii) $x(t)$ の増加に従い $a(\Sigma xx)$ も増加するが、これによって $\Gamma(x)$ は下方にシフトし、その極小点が負になるものもあるため、財のある部分で $x(t)$ は減少に転じる。

(iii) 減少する x は、他の財の $\Gamma(x)$ を上方にシフトさせ更に x を増加させるとともに、これら増加する x は他の減少に転じた $\Gamma(x)$ を更に下方にシフトさせて x を減少させるため、加速度的に分化が進行する。

というプロセスが働く。

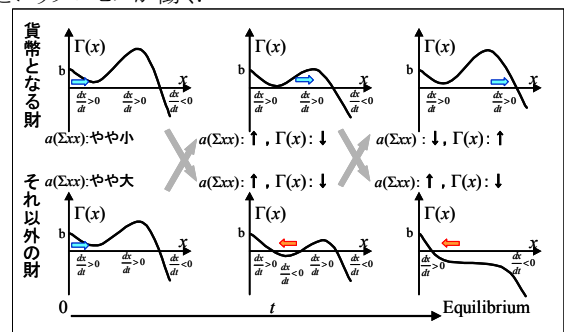


図3 創発(分化)のプロセス

このシナリオが成立するためには、 $\Gamma(x)$ に極小点が存在し解が3つ存在し得ることが必要(十分ではない)であり(図4)、このパラメータ領域において創発を示す数値例を図5に示す。

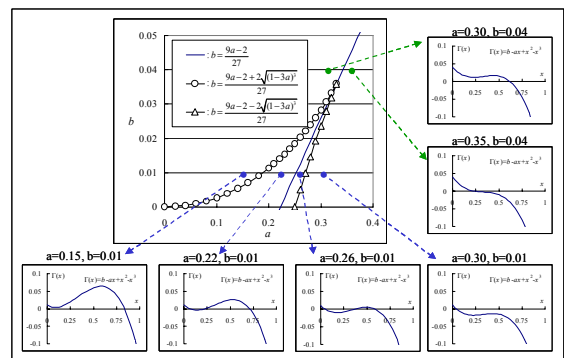


図4 $\Gamma(x)$ が3つの零点を持つ領域(○と△の間)

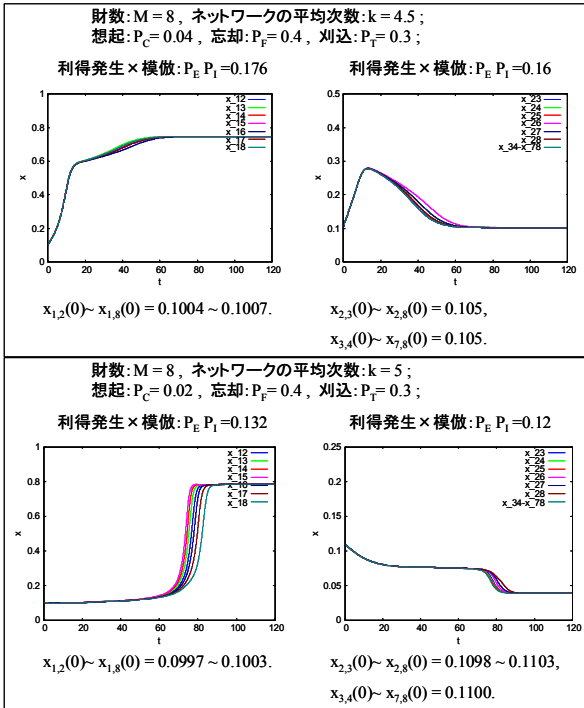


図5 平均場力学系における創発例

4. エージェントベースシミュレーション

4.1 エージェントモデル

平均場力学系は創発シナリオについて解析的なアプローチを可能にする上で有効である。しかし平均場は、社会ネットワークの性質を全て平均次数のみで代表させ、また各エージェントの周囲の状況を全エージェントの平均というマクロ情報で代表させるなど強い条件の下での近似である。

このため次数のばらつき大きい複雑な社会ネットワーク、異質な特性及び初期状態を持つエージェントなどについてその効果を調べるには、自と限界がある。ここではエージェント・ベース・シミュレーション (ABS) によりつつ、マクロな影響の参照を伴う [Yasutomi 1995][安富 2000] ことなく、ミクロな相互作用のみからでも貨幣が創発することを示す。

このシミュレーション・モデルでは前述した財ならびにエージェント間のインタラクションをそのまま実装している。

4.2 シミュレーション

2重ネットワークモデルはもともとエージェント間のミクロレベルの相互作用を記述しているので、ABS においてもその設定は全て有効である。ただし、エージェントが取引財を交換可能な複数から選択する場合のルールとしてボルツマン選択を行うものとする。シミュレーションの結果は、エージェントの内部認識ネットワークを表す隣接行列のエージェント全員についての和 M によって表すこととする。

あるエージェントにおいて財 α のみが「何とでも交換できると認識されている」ことは、内部ネットワーク隣接行列の α 行及び α 列のみが 1 を値として持つ (隣接行列は対称行列) ことをあらしめ、 α が何とでも交換できることが誰とでも成り立つためには、隣接行列の和 M が α 行及び α 列のみが総人口を値として持つことによって示される。

図6及び図7に ABS による貨幣創発の実行例を示す。社会ネットワーク、財、エージェントの性質に応じた設定の中に、貨幣を創発させるものが存在することが示されている。詳細な結果については稿を改めて論じることとする。

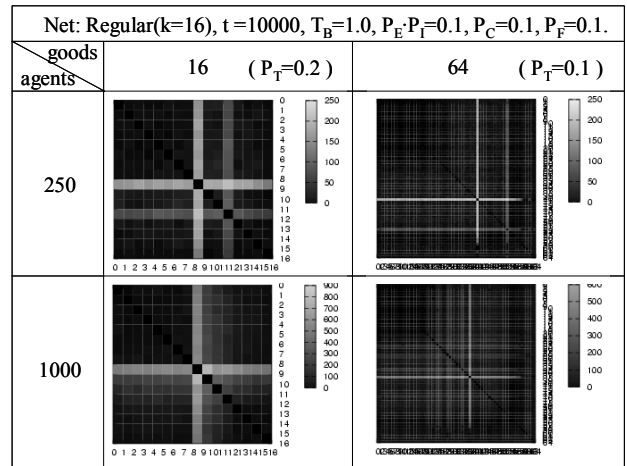


図6 ABSにおける創発例 (隣接行列の和 M の時間変化を濃淡グラフで表現: 白い部分ほど人数が多いことを示す): 社会ネットワークとして Regular [Watts 1998] ネットワークを使用

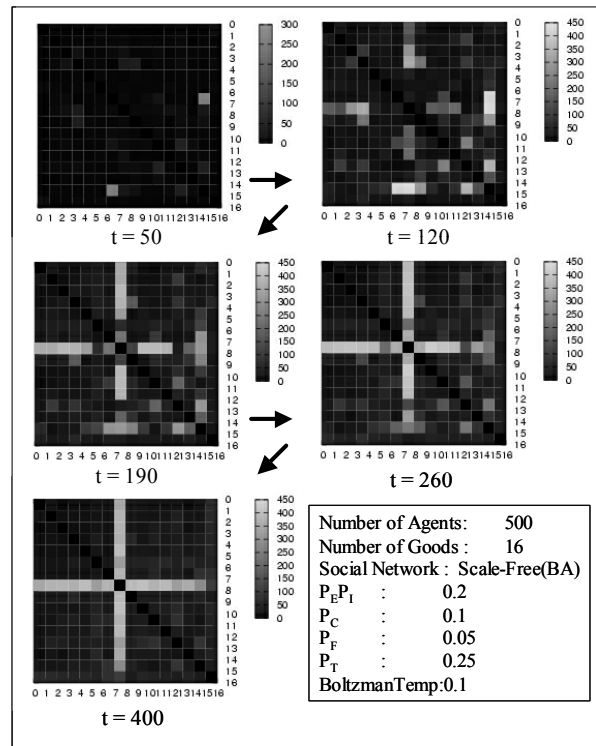


図7 ABSにおける創発例の時系列: 社会ネットワークとして Scale-Free ネットワーク [Barabási 1999] を使用

5. まとめ及び今後の展開

本論文では、2重ネットワーク構造をもつモデルを提案し、貨幣の創発に関する解析的・ABS 双方からの分析に有用であることを示した。

提案モデルの優位性は、社会や財のもつ現実のネットワーク構造を自然に表現することができ、しかも、解析的にもシミュレーションによっても、動的な分析が可能な点にある。

特に、貨幣の創発に関わるモデルに、エージェント間のネットワーク構造を明示的に導入した結果、社会的ネットワークの性質と貨幣創発の関係という新たな領域が分析対象として開かれたという点は重要である。これにより、従来の暗黙のうちに前提とされてきた2次元オートマトン型あるいはランダムマッチ型の社会を離れて、対象とする社会の複雑ネットワークとしての構造を直接反映・比較・変化させつつ、次数分布、Small-World 性、ハブやクラスター、ブリッジ等の各種性質に応じた創発の特徴について検討することが可能となった。

また、2重ネットワークモデルは、貨幣の研究に留まらず、ネットワークで定義された大域的な関係の場の各所に局所的なネットワークが張付き、この局所ネットワーク間の相互作用から大域的な性質が創発するというモデルのフレームの提案でもあり、今後その応用についても開拓していきたいと考える。

参考文献

- [Kiyotaki 1989] Kiyotaki, N., Wright, R.: On money as a medium of exchange, *Journal of Political Economy*, vol. 97, pp. 927-54, 1989.
- [Wright 1995] Wright, R.: Search, evolution, and money, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 19, pp. 181-206, 1995.
- [Luo 1999] Luo, G.Y.: The evolution of money as a medium of exchange, *Journal of Economic Dynamics and Control* vol. 23 pp. 415-458, 1999.
- [Starr 2003] Starr, R.: Why is there money? Endogenous derivation of 'Money' as the most liquid asset: a class of examples, *Economic Theory* vol. 21, 455-474, 2003.
- [Yasutomi 1995], Yasutomi, A.: The emergence and collapse of money, *Physica D* vol. 82, pp. 180-194, 1995.
- [安富 2000] 安富歩: 貨幣の複雑性, 創文社, 2000.
- [Shinohara 2001], Shinohara, S., Gunji, Y., P.: Emergence and collapse of money through reciprocity, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 117, pp. 131-150, 2001.
- [Yamadera 2005] Yamadera, S., Terano, T.: Examining the Myth of Money with Agent-Based Modeling, in Klaus G. Troitzsch ed. "Representing Social Reality" - Pre-Proceedings of ESSA 2005, pp. 258-265, 2005.
- [山寺 2005] 山寺智, 寺野隆雄: エージェント・ベース・モデリングによる通貨の研究- 古典理論の検証と拡張, 計測自動制御学会第 32 回知能システムシンポジウム資料, pp. 373-376, 2005
- [Watts 1998] Watts, D.J., Strogatz, S.H.: Collective dynamics of "small-world" networks, *Nature*, vol. 393, pp. 440-442, 1998.
- [Barabási 1999] Barabási, A.L., Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, vol. 286, pp. 509-512, 1999.
- [Newman 2003] Newman, M. E. J.: The Structure and Function of Complex Networks, *SIAM REVIEW*, vol. 45, pp. 167-256, 2003.
- [松山 2007] 松山科子, 國上真章, 寺野隆雄: エージェントベースシミュレーションによるハブコンテンツ出現メカニズムの解明, 本大会予稿集 1C2-2, 2007.
- [Hicks 1967] Hicks, J.: *Critical Essays in Monetary theory*, Oxford, Clarendon Press, 1967. (貨幣理論, オックスフォード大学出版局, 1969.)
- [都留 1994] 都留重人: 経済学小事典(第3版), 岩波書店, 1994.