

複雑二重ネットワークによる貨幣の創發現象

On the emergence of money through a complex doubly structural network model

國上真章*¹ 小林正人*² 山寺智*² 山田隆志*² 寺野隆雄*²
 Masaaki KUNIGAMI Masato KOBAYASHI Satoru YAMADERA Takashi YAMADA Takao TERANO

*¹ 筑波大学
 University of Tsukuba

*² 東京工業大学
 Tokyo Institute of Technology

In this report, we apply a complex doubly structural network model that is proposed by the authors into a classical problem of economics "emergence of money". This doubly structural network model consists of a global network representing social connections among agents and local networks representing individual recognition. This model can describe a process in which a particular commodity attains natures of money from a barter economy. And furthermore, a bifurcation analysis of a mean field dynamics shows that the consequences of emergence (none, single or double money) are related to the natures of the social network.

1. はじめに

本報告では、経済学における古典的問題である貨幣の創發現象について、貨幣創発のメカニズムと社会構造との関わりを複雑二重ネットワークモデルによって分析するものである。

貨幣の創発とは、ある財が財(特別な価値や性質を有しなくとも)他のあらゆる財との交換手段という特殊な役割を獲得してしまうという現象である。このような貨幣の創發現象はエージェント社会のネットワーク構造にエージェント内部における認識のネットワーク構造の相互作用が引き起こす自己組織化現象として複雑二重ネットワークモデルによって記述し分析することが出来る。

本稿は、2章において複雑二重ネットワークモデルについて紹介する。3章は、貨幣の創發現象及び貨幣の創發現象に対する複雑二重ネットワークモデルの適用について解説する。4章は、貨幣の創發現象の近似力学系モデルとその分岐分析により、特に貨幣の創発/非創発/複数創発について解析する。

2. 複雑二重ネットワークモデル

複雑二重ネットワークモデルは、社会を構成するエージェント間のネットワーク構造と、エージェントが操作・取引・認識・学習等の対象とする客体間のネットワーク構造及びこれらの相互作用による時間変化を併せて表現したものであり、形式的には以下のように定義される。

| | |
|--|---|
| <p>第I種/大域的 2重ネットワークモデル エージェント間(社会)ネットワーク $G^S=(V^S, E^S), V^S=\{v_1^S, \dots, v_N^S\}, E^S \subseteq V^S \times V^S$ V^Sは頂点集合、Sは国の集合を表す。 上添え字Sは社会のネットであることを表す。 下添え字$i=1, 2, \dots, N$は、個々のエージェントを表す。</p> <p>客体(財, コンテンツ等)間ネットワーク $G^C=(V^C, E^C), V^C=\{v_1^C, \dots, v_M^C\}, E^C \subseteq V^C \times V^C$ 上添え字Cは、客体(財, コンテンツ等)のネットであることを表す。 下添え字$m=1, 2, \dots, M$は、個々の客体(財, コンテンツ等)を表す。</p> <p>社会の2重ネットワーク $G^D=(G^S, G^C, E^D), E^D \subseteq V^S \times V^C$ E^Dは各主体と各客体との関係(所有, 利用, 認識等)を表す 社会の2重ネットワークモデル(時間t)発展 $G^D_{t+\Delta t}=F(t, G^D_t)$</p> | <p>第II種/局所的 2重ネットワークモデル エージェント間(社会)ネットワーク $G^S=(V^S, E^S), V^S=\{v_1^S, \dots, v_N^S\}, E^S \subseteq V^S \times V^S$ V^Sは頂点集合、E^Sは辺の集合を表す。 上添え字Sは社会のネットワークであることを表す。 下添え字$i=1, \dots, N$は、個々のエージェントを表す。</p> <p>エージェント内(客体への認識)ネットワーク $G^I=(V^I, E^I)_{i=1, \dots, N}, V^I=\{v_1^I, \dots, v_M^I\}, E^I \subseteq V^I \times V^I$ 上添え字iは内部のネットワークであることを表す。 下添え字$m=1, 2, \dots, M$は、個々の客体(財など)を表す。</p> <p>社会の2重ネットワーク $G^D=\{(v_i^S, G^I_{i=1, \dots, N}), E^S\}$ 社会の2重ネットワークモデル(時間t)発展 $G^D_{t+\Delta t}=F(t, G^D_t)$</p> |
|--|---|

定義 1 2種類の複雑二重ネットワークモデル

ここで、客体間ネットワークがエージェント間ネットワークに対して並立して存在し、双方の間と其々の内部において相互作用をしている場合、本稿ではこれを第I種あるいは大域的な複雑二重ネットワークモデルと呼ぶ。大域的な2重ネットワークモデル

については[松山 07-08]によりコンテンツ流通のメカニズムについてのモデル化と分析が行われている。

これに対して、其々のエージェント毎に客体に対するネットワークが個別に属し、エージェント間ネットワークを介した客体間ネットワーク同士の相互作用をも考慮する場合、本稿ではこれを第II種あるいは局所的な複雑二重ネットワークモデルと呼ぶ。局所的な複雑二重ネットワークは、文化の流布モデル[Axerod 97]あるいは感染症伝播モデル([Pastor-Satorras 02]等)における状態変数をネットワーク構造へ拡張したものになっている。貨幣の創發現象に関する複雑二重ネットワークモデルは、後述するように財と財との間の交換可能性についての各エージェントの内部認識をネットワークとしてモデル化したものであり、後者の局所的な複雑二重ネットワークに属する。

3. 貨幣の創發現象への適用

ここでは、貨幣の創發現象への適用として2重ネットワークモデルに具体的な相互作用のメカニズム([Kunigami 07] [國上 07])を与える。この貨幣創発の2重ネットワークモデルでは、社会ネットワークはエージェント間の取引関係の繋がりを表し、個々のエージェント内部ネットワークは、財と財の交換可能性についての認識を表す。ある財が貨幣として本質的な性質(一般受容性)をマクロレベルで獲得する様子は2重ネットワークモデルの自己組織化現象として表現される。社会的ネットワークを陽に表現することにより、先行研究(数理モデル:[Kiyotaki 89], [Luo 99], [Starr 03] 等, エージェントベースシミュレーション(ABS): [Yasutomi 95], [安富 00], [Yamadera 07])に対し、創発と社会ネットワークの関係を直接分析できるのが、本モデルの特徴である。

3.1 貨幣の創発とは

貨幣とは、(I)計算単位/価値尺度、(II)支払い/流通手段、(III)価値の貯蔵、の3機能により定義([Hayek 76] , [都留 94] 等)される。本研究では、このうち(I)及び(II)の本質的な前提となる一般受容性(「誰とでも、何とでも交換できる」こと)を獲得した財を「原貨幣」とし、原貨幣の発生をもって「貨幣の創発」とする。

ある財 α が原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、殆どのエージェント内ネットワークが、 α をハブ・ノードとするスター状ネットワーク([Starr 03][Yasutomi 95])になるよう自己組織化されることを意味する。(図1)

連絡先: 國上真章, 防衛省勤務 (2008年4月現在)
 mkunigami@nifty.ne.jp

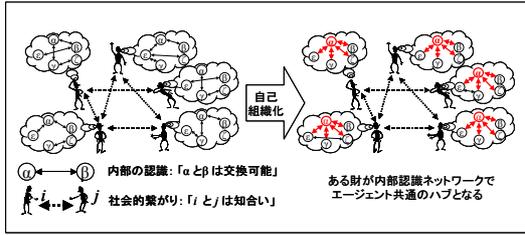


図1 2重ネットワーク上における貨幣の創発 (交換可能性の共通のハブが、一般受容性を表現する)

3.2 相互作用

貨幣創発の2重ネットワークモデルでは、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、交換可能性の認識が一致 ($e_{\alpha\beta}^{(i)} = e_{\alpha\beta}^{(j)} = 1$) するならば取引を行い、確率 P_E で双方に利得を得る。
 - 学習: エージェントは以下(a)~(d)の様により相互学習する。
 - (a) 模倣 (Imitate): エージェント i が $e_{\alpha\beta}^{(i)} = 0$ のとき、 i に隣接する i' と i' に隣接する i'' が α, β の取引で利得を得たならば、確率 P_I で $e_{\alpha\beta}^{(i)} = 1$ にする。
 - (b) 刈込み (Trim): エージェント i が $e_{\alpha\beta}^{(i)} = e_{\beta\gamma}^{(i)} = e_{\gamma\alpha}^{(i)} = 1$ のとき、 $e_{\alpha\beta}^{(i)}$, $e_{\beta\gamma}^{(i)}$, $e_{\gamma\alpha}^{(i)}$ のどれかひとつを確率 P_T で 0 にする (エッジの切断)。(循環交換 (Zirkulartausch) の不効率性 [Menger 23], (p247) による。循環の解消は、エージェントの思考を節約し, [Kiyotaki 89] とも整合的である)
- 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する。
- (c) 想起 (Conceive): エージェント i において $e_{\alpha\beta}^{(i)} = 0$ のとき、確率 P_C で $e_{\alpha\beta}^{(i)} = 1$ にする。
 - (d) 忘却 (Forget): エージェント i において $e_{\alpha\beta}^{(i)} = 1$ のとき、確率 P_F で $e_{\alpha\beta}^{(i)} = 0$ にする。

4. 2重ネットワークモデルの平均場力学系

4.1 平均場力学系

ネットワーク上の感染モデル ([Pastor-Satorras 02]) の平均場 (mean field: 任意のエージェント周囲の状況を全体平均で近似) 力学系を拡張し、ここでは社会ネットワークにおける異なった次数 k 毎の平均として、状態変数: $x_{\alpha,k}$ を「財 α の次数 k の主体における受容性」と定義し、「 α がどれかの財と交換可能となる確率」あるいは、「 M 財中 α と交換できる財の割合」と同一視する。またエージェント間の社会的ネットワークの1ノード (エージェント) あたりの次数を k とし、 k の分布が与えられている時の平均場力学系を構築しその解析を行う。

このとき状態変数の時間変化は相互作用 (3.2 (a)~(d)) から j 次式のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{dx_{\alpha,k}}{dt} &= f_I^{(\alpha)}(x_{\alpha,k}) - f_T^{(\alpha)}(x_{\alpha,k}) + f_C^{(\alpha)}(x_{\alpha,k}) - f_F^{(\alpha)}(x_{\alpha,k}) \\ &= P_E P_I (1 - x_{\alpha,k}) k \left(\frac{\sum_{k'} k' p(k') x_{\alpha,k'}}{\sum_k k p(k)} (k' - 1) \right) \left(\frac{\sum_{k'} k' p(k') x_{\alpha,k'}}{\sum_k k p(k)} \right) \\ &\quad - P_T M x_{\alpha,k}^2 \sum_{\beta \neq \alpha} x_{\beta,k} + P_C (1 - x_{\alpha,k}) - P_F x_{\alpha,k} \quad \dots (1) \end{aligned}$$

($\alpha = 1, 2, \dots, M, \quad k = 1, 2, \dots$)

(1) は, [Kunigami 07] [國上 07] より更に強い近似であるが、これにより貨幣の創発/非創発/複数創発についての分岐分析が可能となる。

4.2 分岐分析による創発シナリオ

2重ネットワークモデルの平均場力学系 (1) において、創発現象を扱うにあたり単純化ため、次数分布についてバラツキがない特定の k 次のみのノードを持つ社会 (Regular Network [Watts 98]) を考える。これは一般性を失うものの社会的紐帯の粗密が、貨幣の創発に影響を与えるかどうかという観点からの、思考実験である。

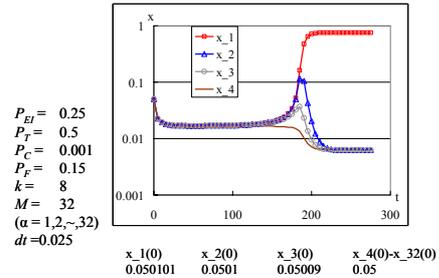


図2 平均場力学系の創発数値例 ($k=8, 32$ 財)

図2では、財について均質であるにもかかわらず、初期値の僅かな違いが引き金となって、他の全ての財と交換可能な財 (「原貨幣」) が一つ (x_1) 創発している。

ここから、創発にとって最終的に影響するのは、受容性 x が最大の財と2番目の財の関係であることが分かるので、1位—2位 のみに注目し3位以下の財を無視した1位—2位近似力学系 (2) を立てる。3位以下の総量 ((2) における σ) が十分小さいとき、1位—2位近似力学系 (2) の均衡点の位置と安定性は貨幣の非創発/単独創発/2重創発の状況を与える。

$$\begin{cases} \frac{dx_\alpha}{dt} = x_\alpha^2 \left\{ A(1 - x_\alpha) - B(x_\beta + \sigma) + \frac{C(1 - x_\alpha)}{x_\alpha^2} - \frac{D}{x_\alpha} \right\} \\ \frac{dx_\beta}{dt} = x_\beta^2 \left\{ A(1 - x_\beta) - B(x_\alpha + \sigma) + \frac{C(1 - x_\beta)}{x_\beta^2} - \frac{D}{x_\beta} \right\} \quad \dots (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_\alpha \equiv x_{\alpha,k}, x_\beta \equiv x_{\beta,k} \\ A \equiv P_E P_I k (k - 1), B \equiv P_T M, C \equiv P_C, D \equiv P_F \\ \sigma \equiv \sigma(x_{ow}) \equiv \sum_{\gamma \neq \alpha, \beta} x_{\gamma,k} \ll (M - 2) x_\beta \end{cases}$$

1位—2位近似力学系 (2) は、2次元の力学系であるため、アイソクライン法による大域的解析が可能である。力学系 (5-3) は各 x について—1次と—2 次 の項を含むため、その係数である C と D (P_C と P_F) について鋭敏である。そこで、 P_C と P_F のある無し及び大小についてアイソクライン法による大域的解析をおこなった。

(1) ケース1: ($0 < P_C, 0 \leq P_F$) アイソクラインは単調

社会ネットワーク次数 k が小さい場合は x_α, x_β 共に受容性が小さい (原点に近い) 共存均衡が唯一の安定となり、貨幣は創発しない (図3左端), k が大きくなると x_α, x_β の共存均衡は不安定化しどちらか一人勝ちする均衡点が安定均衡となり、「原貨幣」がただ一つ創発する (図3中央), k がさらに大きい場合は一人勝ち均衡点は不安定均衡となり、逆に x_α, x_β の共存均衡が共に受容性が大きい位置で再び安定化することで一般受容性を持つ財が複数共存する (「原貨幣」の複数創発) (図3右端)

(2) ケース2: $(0 < P_C, 0 \leq P_F)$ アイソクラインは単峰型

社会ネットワーク次数 k が小さい場合は初期値によほど大きな差がない限り、共存安定均衡である原点へ収束し、貨幣は創発しない(図4左端), k が大きくなると一人勝ちする均衡点のみが安定均衡となり、「原貨幣」がただ一つ創発する(図4中央), k がさらに大きい場合は x_α, x_β の共存均衡が原点から遠い位置で安定化することで一般受容性を持つ財が複数共存する均衡が大きな吸引域を持つ(「原貨幣」の複数創発)(図4右端)

(3) ケース3: $(0 < P_C \ll P_F)$ アイソクラインが屈曲

社会ネットワーク次数 k が小さい場合は初期値によほど大きな差がない限り、原点近傍の共存安定均衡に収束し、貨幣は創発しない(図5左上). k が大きくなると x_α, x_β の共存均衡は不安定化しどちらか一人勝ちする均衡点が安定均衡となり、「原貨幣」がただ一つ創発する(図5右上), k がさらに大きくなると x_α, x_β の共存均衡が原点から遠い位置で再び安定化するが一人勝ち均衡点もまだ安定均衡でありつづける(図5左下). 更に k がさらに大きい場合には一人勝ち均衡点が突然消失し、複数共存(「原貨幣」の複数創発)へと移行する.(図5右下)

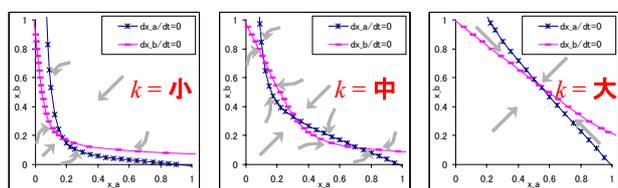


図3 ケース1: 単調なアイソクラインにおける分岐

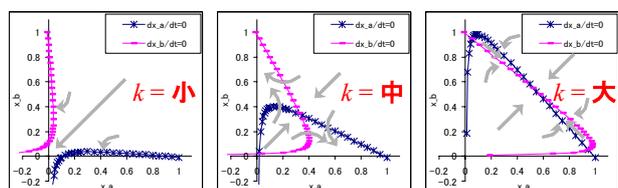


図4 ケース2: 単峰型のアイソクラインにおける分岐

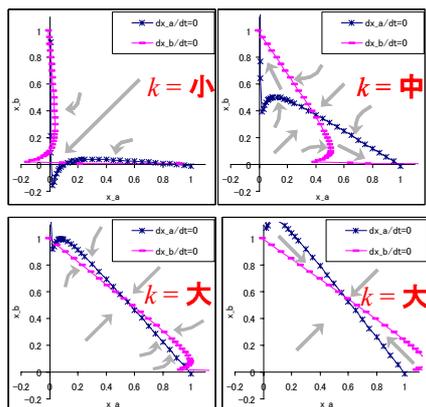


図5 ケース3: 屈曲するアイソクラインにおける分岐

4.3 考察

上の(1)-(3)においてアイソクラインの形態が大きく異なるにもかかわらず、

- ・ 社会ネットワーク次数 k が小さいと貨幣が創発しない
- ・ k が大きくなると一つの財のみが「原貨幣」として創発する
- ・ k が更に大きくなると「原貨幣」が複数創発する

という創発シナリオは共通しており、このシナリオが普遍的であることを示唆している。

このような、社会の性質の変化が貨幣の創発に直接影響するのは本研究の2重ネットワークモデルによって初めて得られた知見である。この知見は、貨幣が創発する社会と創発しない社会について説明を与えるものであると共に、この社会的紐帯の変化(モデル上は外生的であるものの、社会的紐帯の次数は生活水準と共に増大し、社会の崩壊とともに低下すると考えるのは自然であろう)は、先行研究において Yasutomi[1995]:「他人が受取る物を自分も受取る」の閾値の変化, Iwai[1996]:「大きな外乱」, Luo[1999]:「大きな変異」, Yamadera[2005]:「信任の成立」・・・等としていた貨幣創発のトリガーを、社会の下部構造の変化にはじめて接地させるものであり、重要な寄与を与えるものである。

5. まとめ

経済における貨幣の創発現象について複雑2重ネットワークモデルによる分析を行った。

その結果として

- ・ 「原貨幣」の創発(一般受容性の成立)が示された
- ・ 貨幣が創発するためには、貨幣自身の性質の他、社会の構造(主体間の紐帯の粗密)が重要な役割である。
 - ・ 疎な社会 \Rightarrow 貨幣が創発しにくい
 - ・ 密な社会 \Rightarrow 貨幣が(複数)創発し得る
- ・ Yasutomi[1995]の「皆が受取る」, Iwai[1996]の大きな外乱などを社会の下部構造に接地させ得る等の知見を得ることが出来た。

参考文献

[Axelrod 97] Axelrod, R.: The Dissemination of Culture : A Model with Local Convergence and Global Polarization, Journal of Conflict Resolution, vol.41, pp203-326, 1997.

[Hayek 76] Hayek, F.A.: Denationalization of Money - The Argument Refined - , The Institute of Economic Affairs, 1976. (ハイエク: 貨幣発行自由化論, 川田慎二訳, 東洋経済新報社, 1988, 第10,12章.)

[Iwai 96] Katsuhito Iwai : The Bootstrap Theory of Money: A Search-Theoretic Foundation of Monetary Economics, Structural Change and Economic Dynamics vol.7, pp.451-477, 1996.

[Kiyotaki 89] Kiyotaki, N., Wright, R.: On Money as a Medium of Exchange, Journal of Political Economy, vol.97, pp. 927-54, 1989.

[Kunigami 07] Kunigami, M., Kobayashi, M., Yamadera, S. Terano, T.: On Emergence of Money in Self-organizing Doubly Structural Network Model, The Fifth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS2007 Tokyo Japan), 2007.

[Luo 99] Luo, G.Y.: The Evolution of Money as a Medium of Exchange, Journal of Economic Dynamics and Control vol.23, pp.415-458, 1999.

[Menger 23] Menger, C.: Grundsätze der Volkswirtschaftslehre (Zweite Auflage), 1923, ch.9. (メンガー: 一般理論経済学, 八木・中村・中島訳, みすず書房, 1984, 第9章.)

[Pastor-Satorras 02] Pastor-Satorras, R., Vespignani, A.: Immunization of Complex Networks, Physical Review E, vol.65, pp-36104-1~8, 2002.

- [Starr 03] Starr, R.M.: Why is There Money? Endogenous Derivation of 'Money' as the Most Liquid Asset: a Class of Examples, *Economic Theory* vol.21, pp.455-474, 2003.
- [Watts 98] Watts, D.J, Strogatz, S.H.: Collective Dynamics of Small-world Networks, *Nature* vol.393, pp.1302-1305, 1998.
- [Yamadera 2007] Yamadera, S., Terano, T.: Examining The Myth of Money with Agent-Based Modeling, in Edmonds, B. et al.(eds.), *Social Simulation - Technologies, Advances, and New Discoveries*. Information Science Reference, Hershey, pp. 252-262, 2007.
- [Yasutomi 95] Yasutomi, A.: The Emergence and Collapse of Money, *Physica D*, vol.82, pp.180-194, 1995.
- [國上 07] 國上真章, 小林正人, 山寺智, 寺野隆雄: 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, 第 21 回人工知能学会全国大会, 2007, 1C3-2.
- [都留 94] 都留重人: 経済学小事典(第3版), 岩波書店, 1994, 「貨幣」.
- [松山 07a] 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, 第 21 回人工知能学会全国大会, 2007, 1C2-2.
- [松山 07b] 松山 科子, 國上 真章, 寺野 隆雄: ABS によるコンテンツ流通メカニズムの解析, 日本ソフトウェア科学会 ネットワークが創発する知能研究会第 3 回ワークショップ, 講演論文集, pp.16-23, 2007.
- [松山 08] 松山 科子, 國上 真章, 寺野 隆雄: 複雑二重ネットワークを用いた情報流通の分析, 第 22 回人工知能学会全国大会, 2008, 2C2-3.
- 安富[2000] 安富 歩: 貨幣の複雑性—生成と崩壊の理論, 創文社, 2000, 第 3 章.