

人工社会と貨幣交換

長谷川 敦士

植田 一博

東京大学大学院 総合文化研究科 広域システム科学系

〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

hase@gogh.c.u-tokyo.ac.jp ueda@gould.c.u-tokyo.ac.jp

あらまし

本稿では、利己的な行動を定義した経済主体(エージェント)が、商品の交換活動を行う中から貨幣的役割を演じる商品を生み出す現象を紹介した。また、利己的なエージェントが協調的なふるまいをみせる現象についての説明を行い、その結果としてエージェントの保持する内部パラメータが協調して増加するしくみについて論じた。そして、エージェントが行う情報交換がそのような協調現象にどのような役割を持つかについて論じた

キーワード マルチエージェント, 人工市場, 貨幣, 人工社会, 協調, 創発

The Emergence and Exchange of Money in A Society of Artificial Agents

Atsushi HASEGAWA

Kazuhiro Ueda

Dept. General Systems Studies, The Univ. of Tokyo.

Komaba 3-8-1, Meguro, Tokyo 153-8903 JAPAN

hase@gogh.c.u-tokyo.ac.jp ueda@gould.c.u-tokyo.ac.jp

Abstract

In this paper, we explain how the concept of money can emerge in a society of artificial agents.

In our simulations, the agents are able to exchange items with each other based on local rules and preferences. Although they are fully selfish and have no global information, they are able to behave in a cooperative manner and through the trade develop a concept of money.

The focus of this paper will be on the principle of this cooperation and the role of the information exchange between the agents.

key words Multi agents system, Artificial Market, Artificial Society, Money, Cooperation, Emergence

1 はじめに

Carl Menger[1] のコンセプト, 「利己的でなんら中央集権的な権力が介在しない状況で, 個人の欲求から貨幣は生まれうる」を実装するために, これまでにいくつかの計算モデル, 理論モデルが提案されてきていた (Jones[2], Oh[3], Iwai[4], Kiyotaki and Wright[5], Marimon, McGrattan and Sargent[6], Yasutomi[7], and Hasegawa and Ueda[8]).

これらのモデルにおいては, 個人の行動を外部からの入力に基づく行動決定アルゴリズムとして記述した, 経済主体 (エージェント) が定義される. ここで貨幣概念の創発とは, 明示的に貨幣の知識を持たないようなエージェントの系において, 貨幣的なふるまいを示すような物質や現象があらわれることをいう.

本研究では, 利己的な振舞いを定義したエージェントの物々交換から貨幣的な役割を持つ商品が現象を紹介する. またその中で生じるエージェントの協調動作について議論を行い, エージェントの情報交換がどのような意味を持つかについて論じる.

2 貨幣交換モデル

2.1 物々交換と貨幣交換のモデル

さて, 実際に人工社会における物々交換のモデルを考える. ここでは[7]のモデルを元にした, より議論しやすくするためのモデルを考える.

まず環境として, N 人のエージェントと N 個の商品がある状況を考える. 系においてエージェントにはエージェント同士の1対1の相互作用だけが許され, エージェントは系全体に関する情報は手に入れることができないとする. 各エージェントはそれぞれ固有の商品を生産することが可能である. つまり i 番目のエージェントは i

番目の商品を生産できる. またエージェントは自分の生産できる商品を含めた全ての商品を保持することができる. ここでは商品の量は問題にせず, それぞれの商品に関して保持しているか否かだけを問題とする. エージェントは, 常に自分の生産できるもの以外のなんらかの単一の商品を欲求しており, エージェントはその商品を獲得するために, 他のエージェントに対して自分の保持しているものとの交換を呼びかける. そしてエージェントは欲求している商品を獲得すると, その商品を消費しまた別のものを欲求し始める.

この状況において任意の2人のエージェントを選びだし, 彼らに交換を行わせるときどうなるであろうか. 2人のエージェントの欲求している商品と所持している商品とがそれぞれ一致する確率は概ね $1/(N-1)^2$ となり, N が大きくなるに従い交換が成立するのは困難となる. このことは, 「欲求の二重の一致問題」として知られている. この困難を解消するために, エージェントに「人気の高い商品は自分が必要なくても受け取る」というルールを持たせる. これは, 環境において人気の高い商品を受け取っておくことによって, 後に自分が欲求するものを入手しやすくなるであろうという予測に従ってとる方策である.

しかし, ここでエージェントは環境における大局的な情報を得ることができないので, エージェントが持ちうる商品の人気に関する情報は「各々個人がその商品を系においてどれだけ人気が高いと考えているか」で規定する. 具体的にはエージェントは交換活動を行う際に, 相手が欲求している商品に関して人気の評価を上げることにする. そしてあるエージェントがある商品に関して十分人気が高いと考えるとき, すなわちある商品の評価が一定以上となったときに, そのエージェントは自分が欲していなくても相手から交換の対象としてその商品を受け取

る。この評価のために人気の評価の閾値 P を導入し、人気の評価の値が P の値よりも大きいときエージェントはその商品が人気があると考えたとする。

以上のことを各エージェントの内部パラメータ $Desire$, $Property$ そして $Popularity$ という3種類で表現する。 $Desire_I$ はエージェント I の欲求をあらわし、

$$Desire_I = m \quad (1)$$

$$(m = 1, \dots, N)$$

と示される。 $Property_I$ はエージェント I の商品の保持状態をあらわし、

$$Property_I = \{property_I(1), \dots, property_I(N)\} \quad (2)$$

$$(property_I(i) = True \text{ or } False)$$

と示される。 $Popularity_I$ はエージェント I の考える商品の人気の評価をあらわし、

$$Popularity_I = \{pop_I(1), \dots, pop_I(N)\} \quad (3)$$

$$(pop_I(i) \text{ は実数})$$

と示される。ただし、各エージェントの商品の人気の評価は規格化され、ある定数を越えないものとする。規格化の定数を N とすると、エージェント I について、

$$\sum_i pop_I(i) > N \text{ となったら}$$

$$pop_I(i) = pop_I(i) \frac{N}{\sum_i pop_I(i)} \quad (4)$$

となる。これは新しい人気の評価が各エージェントに与えられた際に、それまでの古い情報の価値が低下することを意味する。

モデルのふるまいが初期値の偏りによるものになることを防ぐために、初期値として各エージェントはそれぞれ欲求と所持とが一致しない

ように、一様に別々の商品を欲求し、それぞれが生産できる商品を所持しているとする。この条件によってエージェントが単純な物々交換を行った際にはエージェントが交換を行うことはできない。

さて、このようなエージェント達に対して以下のような交換手順を考える。

1. 系のなかからランダムに2人のエージェントを選び出す。これらのエージェントを A , B とし、エージェントの欲する商品をそれぞれ x , y とする。
2. エージェントはお互いに相手に対し自分が欲する商品を要求する。また、もし相手が自分が人気が高いと考えている商品を保持しているときは、人気の高い順に相手にその商品を要求する。
ここで自分が欲している商品は人気が高いと考えている商品よりも優先して要求される。すなわち、 A は x , $pop_I(i) > P$ である商品 i を $pop_I(i)$ の高い順に B に要求する。 B も同様である。
3. お互いに要求する商品が存在した場合、エージェント達は優先順位の最も高い商品を交換する。
4. もし自分の欲していた商品を手に入れられたならば、エージェントはその商品を消費する。
5. 各エージェントは自分の生産できる商品が手元からなくなっていたらこれを生産する。すなわち、

$$property_I(i) = False$$

ならば

$$property_I(i) = True \quad (5)$$

ここで $property_I(i)$ はエージェント I の商品 i に関する保持情報でエージェント I は商品 i を生産できるものとする。

6. エージェントはお互いに相手の欲求している商品に関して自分の商品に関する人気の評価を更新する. 各エージェントは相手が欲求している商品に関して, 自分の人気の評価を1増加させることとする. つまり,

$$\begin{aligned} pop_A(y) &= pop_A(y) + 1 \\ pop_B(x) &= pop_B(x) + 1 \end{aligned} \quad (6)$$

とする.

7. エージェントは人気の知識の交換を行う. すなわち, 全ての i について,

$$pop_A(i) = pop_B(i) = \frac{pop_A(i) + pop_B(i)}{2} \quad (7)$$

とする.

この交換手順を1取引とよぶことにする. ($N \times 10$) 取引を1ターンとよぶ. これらの条件で計算機上でシミュレーションを行った.

2.2 貨幣の創発

さて, 先程の単純な物々交換においては, 交換はほとんど成立しないため, エージェントは欲求する商品を消費することができなかった. この人気の高いものをを受け入れるルールを適用した場合, エージェントの消費, 交換活動がどのように変化するかを調べる.

図1に, $P = 2$, $N = 50$ のときの各ターンにおけるエージェントの交換活動の成立した数と系の中での消費数の合計を示す. ここで **TRADE** はエージェント間の取引において, エージェントの欲求するものが交換されなくてもなんらかの交換が成立した回数, **CONSUMPTION** は実際にエージェントが欲求している商品を手入して, それを消費できた回数をあらわす. また, 図2には各ターンにおける, それぞれのアイテ

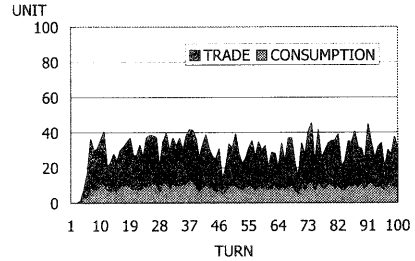


図1: 人気の評価の閾値 $P = 2$ のときの, エージェントの交換活動数と消費数

ムについて, それを最も人気が高いと考えているエージェントの数を示す.

図1によると, エージェントは数ターン目から商品の交換活動を行えるようになり, それに伴ってエージェントは欲求している商品の消費も可能となった. 図2によるとターンごとに常にエージェント達の人気の評価はなんらかの商品に集中している. この特定の商品への人気の集中が, 系の全てのエージェントがその商品を受け入れる状況をつくり出し, これによってその人気の高い商品を交換の媒体として用いることが可能となる. そしてその結果エージェントは自分の本当に欲求している商品を手入できるようになる. この人気の評価の高い商品は, 系において欲求の二重の一致による交換の困難を解消する働きをもっている. このためにこのシステム自体をある種の貨幣であると考えられるであろう. 通常我々の社会における貨幣は, 価値の貯蓄などの問題から共通に認めた単一の商品を用いる. しかし交換の困難を解消するためだけであればこのような複数の商品を選択するような状態の貨幣でも機能すると言える.

ところで, ここでの貨幣は「人気の高い商品を後の交換のために受け取る」というルールから

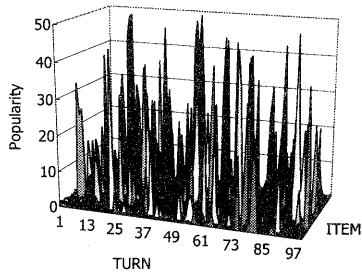


図 2: 人気の評価の閾値 $P = 2$ のときの、各商品の人気の評価の高さ (その商品を何人のエージェントが最も人気が高いと考えているか)

生じている。このルールは人気の高い商品を交換の媒体とするとことを暗に意味しており、その意味ではこの貨幣の創発はルールに含まれた現象ということが可能である。しかし、なぜ特定の商品にエージェントの人気の評価が集中するかについては自明ではない。このことは 2.4 で議論する。

2.3 人気の評価の閾値 P による依存性

さて人気の評価の閾値 P は、各エージェントがどの程度の人が欲求していればその商品の人気があるとみなすかということを示している。この閾値をあげていくと、次第にエージェントはなかなか自分の欲求する商品以外を受け入れなくなり、最終的には単なる物々交換の場合と同じように交換が成立しなくなる。図 3, 4 に $P = 4$ 、 $N = 50$ の場合のターンごとのエージェントの交換、消費高と各商品ごとの人気の評価を示す。図 4 によると、特定のエージェントによる人気の評価の集中は断続的ではなく突発的にだけ生じている。またエージェント間の交換成立数、消

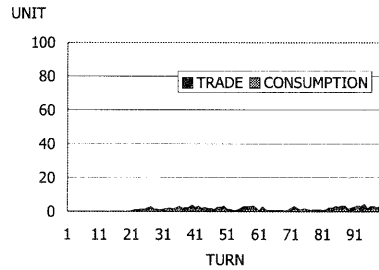


図 3: 人気の評価の閾値 $P = 4$ のときの、エージェントの交換活動数と消費数

費数は $P = 2$ の場合に比べて低下している。図 5 に人気の評価の閾値 P が 1 から 5 のときの 100 ターンにおけるエージェント全体の平均交換活動数と消費高を示す。ここで交換の閾値 P が 1 のときに比べ、2 のときのほうが、交換活動、消費活動共に盛んになっている。これは 2.5 にて議論される、系における消費対象商品の供給量に起因する問題であると考えられる。しかしながらこの評価の閾値 P による系の振舞いに関してはまだ分析が不十分であり、系のエージェント数 N との関係と共に今後さらに調査する必要がある。

2.4 情報の集中のメカニズム

ここでは、エージェントの人気の評価がターンを追うごとに特定の一つの商品に集中している現象について調べる。

エージェント達の特定の商品への人気の評価の集中は、系の中におけるなんらかの非対称性に起因すると考えられる。エージェントの持つルールは全てのエージェントに関して対称でなんら非対称性を持たない。また交換の最初の段階においては、エージェントの持つ *Desire*、*Property*

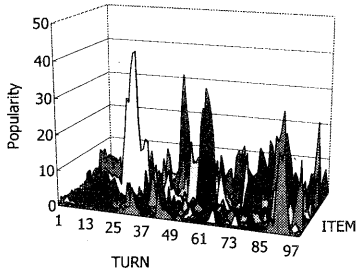


図 4: 人気の評価の閾値 $P = 4$ のときの、各商品の人気の評価の高さ (その商品を何人のエージェントが最も人気が高いと考えているか)

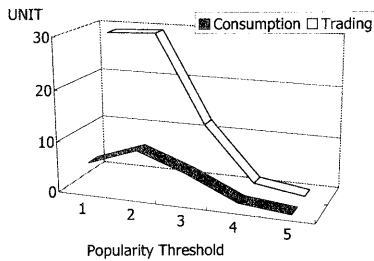


図 5: 人気の評価の閾値と、100 ターンにおける全エージェントの交換数と消費数の平均

及び *Popularity* に関して、系の中で全ての情報は対称である。つまり、どのエージェントと商品を選び出してもそのエージェントを他のエージェントと区別できない。

交換が成立しない環境において、エージェントが交換のための交渉を繰り返すことで情報交換と *Popularity* の更新が進行する。このとき一人のエージェントから見て、他のエージェントの欲求している商品は全て異なっているので、*Popularity* は自分の欲している商品以外の全ての商品に関してほぼ均等な割合で上昇する。その結果、エージェント間において偶然 *Popularity* が高くなったアイテムを通じて交換が生じる。そのようにして、自分の欲求する商品を入手できたエージェントがあらわれるとき、以下のような手順で特定の商品の人気の評価が高まる。

1. 自分の欲する商品を入手することができたエージェントは、別の商品に欲求を変更する。
2. ここで、系の中では、 $N - 2$ 種類の商品が別々のエージェントに欲求され、ある 1 種類の商品 Q が 2 人のエージェントに欲求されていることになる。
3. これで、次にあるエージェントの組が交換の交渉を行う際に相手が商品 Q を欲求している頻度は他の商品に比べて高くなる。
4. この結果、系の中のある商品 Q の人気の評価が上昇しやすくなる。
5. この情報は、エージェント間の情報交換によって他のエージェントにも伝搬する。

次に、ある商品 Q の人気の評価の集中が解消され、他の商品 R に人気の評価が集中する原因を考える。各エージェントの人気の評価の値は合計を一定の値に正規化させているため、新しい情報を得ると古い情報の重みは減少する。ここで、系の中である商品に関する人気の評価が集中して上昇したとき、その理由としてはその商品を欲求しているエージェントの数が他の商

品に比べて多いことがあげられた。その結果人気の評価の高い商品の流通が潤滑となり、その商品がそれを欲求しているエージェントに到達しやすくなる。こうして欲求している商品を手に入れることができたエージェントは欲求を変更するので、その商品を欲求しているエージェントの数が減少することになる。このために、相対的に他の商品を欲求しているエージェントの数が多くなり、それまで次に人気が高かった商品の人気の評価が上昇することになる。

2.5 情報交換と Popularity の集中

エージェントは交換活動を行う際に、互いに相手の欲求を見て自身の *Popularity* を更新した後、その情報の交換を行う。この行為は、エージェント同士の直接の相互作用によってもたらされる情報を、元の情報提供者から見れば第三者へ伝える効果をもたらすと考えられる。この効果を調べるために、情報の交換を行わない状況と比較を行う。

図6に、情報の交換を行わなかった場合における交換活動数と消費数、図7にその場合のエージェントの人気の評価を示す ($N = 50, P = 2$)。図7と図2と比較した場合、エージェントの人気の評価は特定の商品に極端に集中していないことがわかる。これは、エージェントが自分の直接交渉した相手からのみ情報を得ている状況においては、系における他のエージェントの人気の評価の情報が伝搬しないことによる。この時、エージェントの欲求していた商品に対する消費数、及びエージェント間の交換の成立数は共に増大した(図6)。

これは、エージェントの欲求が集中しなかったために、限られた絶対量の商品のなかで、エージェントへこれらの商品の分配がスムーズに進行了からと考えることができる。つまりこれは、系の中での商品の交換を潤滑に行う際には

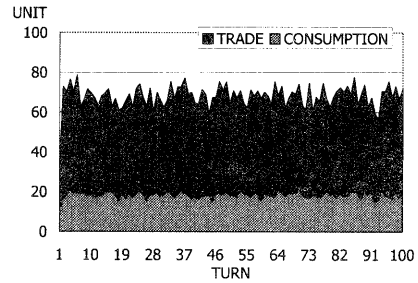


図 6: 人気の評価の閾値 $P = 2$ で情報の交換を行わないときの、エージェントの交換活動数と消費数

エージェント数に対する適切な商品の量というものが存在することを意味する。現在モデルにおいては商品の固有性は存在しているが、その価値は等価である。このため、情報交換を行わずに交換活動を行った際には、エージェントの全体数に対して系の中で交換に使用可能な商品の数が増大したと考えることができる。

3 おわりに

利己的なエージェントが、ルールを拡大することによって単純な物々交換から交換の媒介のための商品を通じた交換を行う現象を観察した。この交換の媒介のための商品はある種の貨幣であると考えることが可能である。また、エージェントの協調作業は情報交換を通じてよりいっそう促進される結果となった。

エージェントの特定の商品への人気の評価が集中する理由は、以下のようにまとめられる。

1. 系の中で特定の商品を複数のエージェントが欲求すると、その商品の *Popularity* が上昇する機会が増える。

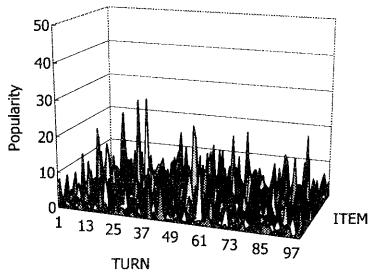


図 7: 人気の評価の閾値 $P = 2$ で情報交換を行わないときの、各商品の人気の評価の高さ(その商品を何人のエージェントが最も人気が高いと考えているか)

2. 情報の交換を行うことにより、*Popularity* の高くなった商品に関してのその傾向が伝達される。

この機構によって人気の評価の集中は理解されたが、その上昇の条件については今後さらに調査する必要がある。

参考文献

- [1] Menger, C. (1871), *Principles of Economics*, translated by J. Dingwall and B. F. Hoselits.
- [2] Jones, R. A. (1976), The Origin and Development of Media Exchange, *Journal of Political Economy*, 84
- [3] Oh, S. A. (1989), A Theory of Generally Acceptable Medium Exchange and Barter, *Journal of Monetary Economics*
- [4] 岩井 克人 (1993), 貨幣論, 筑摩書房, 東京

- [5] Kiyotaki, N., and R. Wright (1989), On money as a medium of exchange, *Journal of Political Economy*, 97: 927-954.
- [6] Marimon, R., E. McGrattan, and T. J. Sargent (1990), Money as a medium of exchange in an economy with artificially intelligent agents, *Journal of Economic Dynamics and Control* 14: 329-373.
- [7] Yasutomi, A. (1995), The emergence and collapse of money, *Physica D*, 82, 180-194.
- [8] 長谷川 敦士, 植田 一博 (1999), 貨幣の創発, *ICCS/JCSS99 Proceedings*, 1191-1194.