

# 通貨取引エージェントを導入した国際貿易モデルにおける 市場の安定性に関する研究

佐々木雄一<sup>†</sup> 川村 秀憲<sup>†</sup> 車谷 浩一<sup>††</sup> 大内 東<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 北海道大学大学院工学研究科

〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

<sup>††</sup> 産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター

〒 135-0064 東京都江東区青海 2-41-6

E-mail: †{yuichi,kawamura,Ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp, ††kurumatani@w-econ.org

**あらまし** 本研究は、貿易や国際経済の問題を考える上で重要な要素となる基軸通貨について取り上げる。実験では、通貨選択の基準として通貨の信用度の概念を導入した人工国際貿易モデルを構築し、基軸通貨がボトムアップに創発する現象を観察する。人工国際貿易モデルを導入するエージェントの組合せを変えることによって市場の振る舞いがどのように変化するかを考察する。実験の結果、通貨の投機的な取引を行うエージェントを導入することで通貨レートが安定するだけでなく、市場価格も安定し、取引量も増大した。さらに、機軸通貨国とその他の国の間に生産傾向の違いが現れ、各国は特定の財の生産に特化する現象が観察された。

**キーワード** 人工市場, マルチエージェント・シミュレーション, 基軸通貨, X-Economy, 国際貿易

## Stability of the Market in The International Trade Model Introduced Foreign Exchange Agents

### Medieval Times Model of World Trade League

Yuichi SASAKI<sup>†</sup>, Hidenori KAWAMURA<sup>†</sup>, Koichi KURUMATANI<sup>††</sup>, and Azuma OHUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan

<sup>††</sup> Cyber Assist Research Center (CARC),

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Aomi 2-41-6, Koto-ku, Tokyo, 135-0064 Japan

E-mail: †{yuichi,kawamura,Ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp, ††kurumatani@w-econ.org

**Abstract** In this research we take up the key currency as an important factor of considering world economy and international trade. We propose an international trade model with the currency credibility as a criterion of selection of the payment method, and construct artificial international trade markets. In proposed model, we observe the process of emergence of key currency. In the simulation, we consider how the behavior of market would change, by altering combination of agents. The results of simulations show that the agents, which deal in currencies for speculation, not only stabilize currency exchange rate but also stabilize market price and trading volume.

**Key words** Artificial Market, Multi-Agent Simulation, Key Currency, X-Economy, World Trade

# 1. はじめに

近年、通貨の役割やその発生の仕組みなどに関する研究が社会科学者だけでなく、マルチエージェント研究の面からも注目されている [1,2]. 本研究は、貿易や国際経済の問題を考える上で重要な要素の一つとなる基軸通貨について取り上げる.

基軸通貨とは国際間の決済や金融取引に広く使用される通貨のことである. 一般的にいわれる基軸通貨となるための条件は 1) 資本の供給国であること, 2) 経済規模が大きいこと, 3) 政府が国際収支の動向に対して受身の姿勢をとることなどが挙げられている [3].

国際取引において決済に用いられる通貨は取引の当事者のどちらかの通貨が用いられる場合もあれば, 第三の国の通貨を用いる場合もありうる. このような状況では取引を成立させるためにどの通貨で支払いを行うかという選択と, 取引相手の合意が必要となる.

これまでの研究では基軸通貨がボトムアップに創発する現象を人工国際貿易モデルによって観察し, 基軸通貨の創発の仕組みについて考察した [4,5,6,7]. 本研究では通貨の投機的な取引を行うエージェントをこれまでの人工国際貿易モデルに導入することによって通貨レートが安定し, 国際間の取引量が増大することについて考察する.

## 2. 国際貿易モデル

ここでは, 発達した金融システムの存在しない, できる限り単純な国際貿易モデルを考える. このモデル [4,5] には複数の国が存在し, 各国は自国の通貨を持っている. 各国には生産と消費を行う生産エージェント [8,9,10,11,12] と, 国を越えて取引を行う貿易エージェントが存在する (図 1, 2). 生産エージェントは毎期 Food か自国通貨のどちらか一方を生産し, Food を一定量消費する. 生産される財は生産力と前回の価格をもとに価値の高い方が選択される. Food は生産エージェントによって消費される一般の消費財であり, 通貨は貯蓄や交換の媒体として用いられる財である.

各国内には国内市場があり, 自国の通貨によって Food を取引する. 生産エージェントは Food の保有量を一定に保つために国内市場で Food を売買する. 一方, 貿易エージェントは生産・消費を行わないエージェントである. このエージェントは裁定取引, つまり市場間の価格差を利用して安い市場で Food を

買い, 高い市場で Food を売ることで利益を得ようとする. 自国と他国の価格差が一定の割合以上あるときに売りと買いの注文を, 一方は国内市場に, 他方は国際市場に同時に出す. 異なる国に属する貿易エージェント同士の取引は全て国際市場で行われる.

国際市場には通貨市場と Food 市場が存在し, 貿易エージェントが取引を行う. 通貨市場では通貨同士の交換を, Food 市場では Food と通貨の交換を行う. Food の取引の方法はランダムに選ばれた貿易エージェント同士が一对一で行う相対取引である. Food 市場での決済にはいずれかの国の通貨が用いられるが, その決定は貿易エージェントが持つ通貨の信用度によって行われる. さらに, 通貨市場に通貨取引エージェントというエージェントを導入する. このエージェントは通貨市場において, 通貨の投機的な取引を行う. レートの安いときに通貨を買い, 高いときに売ることによって, 利益を得ようとする.

ここで, 各エージェントの各財に対する取引の目的をまとめると, 生産エージェントは Food の実需的な取引を行い, 貿易エージェントは Food の投機的な取引を行う. また, 貿易エージェントは Food の買い付けに必要な通貨の実需的な取引を行い, 通貨取引エージェントは通貨の投機的な取引を行う (表 1).

表 1 各エージェントの各財に対する取引の目的

	実需的取引	投機的取引
Food	生産エージェント	貿易エージェント
通貨	貿易エージェント	通貨取引エージェント

## 3. 通貨の信用度

信用度の概念を導入するのは, 国際市場ではどの通貨で支払いを行うかが問題となり, 支払い方法の選択の基準が必要となるためである.

このモデルでの通貨の信用度とは, 各貿易エージェントが各通貨に対して持つ需要の大きさを示す変数のことである. 国際市場での Food 取引において商品の売り手が要求する通貨に対して需要があると判断する. このモデルでは通貨の信用度を持つのは貿易エージェントのみであり, 各貿易エージェントの持つ各国通貨に対する信用度はそれぞれ異なる.  $k$  国の貿易エージェント  $j$  が持つ  $k^*$  国の通貨の信用度は次のように計算される.

$$C_{(k,j)}^{k^*}(t) = C_{(k,j)}^{k^*}(t-1) + \alpha \cdot amount_{(k',j')}(t), \quad (1)$$

ここで,  $amount_{(k',j')}(t)$  は Food の売り手,  $k'$  国の

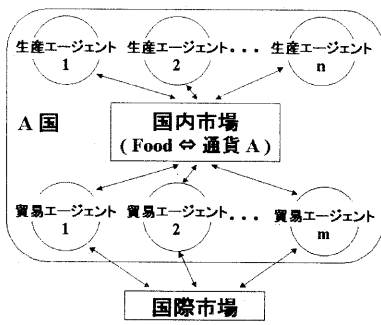


図1 国内市場の概念図

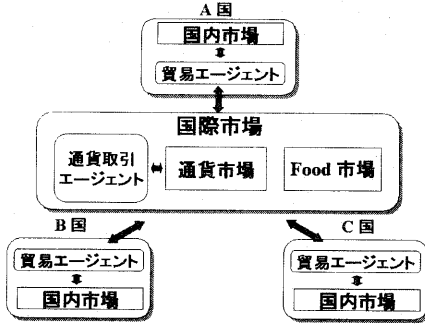


図2 国際市場の概念図

貿易エージェント  $j'$  が提示した Food の量で、 $\alpha$  は正の定数である。さらに、各国の通貨の信用度の合計が1になるように正規化する [1,2]。つまり、次式によって置き換えられる。

$$C_{k,j}^{k*}(t) = \frac{C_{k,j}^{k*}(t)}{\text{total}_{(k,j)}(t)}, \quad (2)$$

ここで、

$$\text{total}_{(k,j)}(t) = \sum_{j=1}^N C_{k,j}^I(t), \quad (3)$$

とする。

貿易エージェントは Food の売り手、買い手共に最も信用度の高い通貨を支払手段として要求する。貿易エージェントが Food の買い手の場合には、(1) 式にしたがって要求された通貨の信用度を上げる。支払手段の通貨が一致しなければ、一致するまでどちらかが替わりの通貨を提示する。信用度の値がある閾値  $T$  より小さい通貨は受取らないことで、国際市場で取引に使用される通貨とされない通貨が現れる。始めは自国の通貨の信用度を 100% とする。

貿易エージェントは各国通貨の保有量の比が信用

度の比と同じになるように、通貨市場で取引を行う。つまり、信用度の比によって理想的な保有量が決まり、その量を超えたときには売り、不足したときには買う。信用度が高い通貨ほど過去に需要が大きかったことを意味し、国際市場での使用機会が多いと予測するからである。しかし、自国通貨に限っては、ある程度の保有量がないと自国で Food を買付けることができなくなるため、保有する通貨量全体の何割かを保とうとする。この割合を  $\lambda$  とする。

## 4. エージェントの設計

### 4.1 生産エージェント

生産エージェントは Food と自国通貨を生産することができる。生産できる財の量は各生産エージェントの持つ生産力によって決定される。 $k$  国の生産エージェント  $i$  の food の生産力を  $skill_{(k,i)}^f$  とし、通貨の生産力を  $skill_{(k,i)}^c$  と表記する。生産エージェント  $i$  は、Food の価値よりも通貨の価値が高いとき、つまり以下の条件を満たすとき通貨を生産、満たさないときには Food を生産する。

$$skill_{(k,i)}^c > P_k(t-1) \cdot skill_{(k,i)}^f, \quad (4)$$

$P_k(t-1)$  は  $k$  国の前期の Food 価格である。生産エージェントは Food の保有量が望ましい量になるように国内市場で取引を行うが、このときの望ましい Food の在庫量を *reserve level* と表す。Food の在庫量が *reserve level* を超えたときに Food を売り、反対に不足したときには Food を買う。Food の在庫量と *reserve level* の差が注文量となる。生産エージェントは、Food の保有量が不足しているときほど高い注文価格をつける。また、通貨の保有量が多いときほど高く買い、安く売る。 $k$  国の生産エージェント  $i$  の Food の保有量を  $food_{(k,i)}$ 、通貨の保有量を  $currency_{(k,i)}$ 、全ての生産エージェントの *reserve level* を  $r$  とすると、 $k$  国の生産エージェント  $i$  の  $t$  期における Food の注文価格は次式で表すことができる。

$$Bid_{(k,i)}(t) = B(f_{(k,i)}, c_{(k,i)}) \cdot P_k(t-1), \quad (5)$$

ここで

$$\begin{aligned} f_{(k,i)} &= food_{(k,i)} / r, \\ c_{(k,i)} &= currency_{(k,i)} / (P_k(t-1) \cdot r) \\ B(f_{(k,i)}, c_{(k,i)}) &= (B(0, c_{(k,i)}))^{(1-f_{(k,i)})} \\ B(0, c_{(k,i)}) &= b_{0\infty} - (b_{0\infty} - b_{00}) e^{-\gamma c_{(k,i)}} \\ B(0, 0) &= b_{00}, B(0, 1) = b_{01}, B(0, \infty) = b_{0\infty} \\ \gamma &= \ln\left(\frac{b_{0\infty} - b_{00}}{b_{0\infty} - b_{01}}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

となり、 $B(0,0)$ ,  $B(0,1)$ ,  $B(0,\infty)$  は関数  $B(f_{(k,i)}, c_{(k,i)})$  のパラメータである。

#### 4.2 貿易エージェント

貿易エージェントは Food の空間的な投機を行う。つまり、価格の安い国で Food を買い、価格の高い国に Food を売る。貿易エージェントは大きく分けて二種類の取引、すなわち、Food の取引と通貨同士の取引を行う。 $k$  国の貿易エージェント  $j$  は (7) の条件を満たすときに国内市場に買いの注文を出し、同時に国際市場に売りの注文を出す。

$$P_{MAX_k}(t-1) - P_k(t-1) > P_k(t-1) - P_{MIN_k}(t-1) \quad (7)$$

$$margin_{(k,j)} > P_{MAX_k}(t-1)/P_k(t-1) - 1,$$

ここで、 $P_{MAX_k}$ ,  $P_{MIN_k}$  はそれぞれ、各国の Food 価格を自国の通貨レートに換算し、その中の最も高い価格と最も安い価格である。 $margin_{(k,j)}$  は各生産エージェントに定められた正の定数である。この  $margin_{(k,j)}$  の値が大きいほど、より価格差が大きいときに取引を行う。エージェント  $j$  の注文価格は  $P_k(t-1) \cdot (1 + margin_{(k,j)}/2)$  となる。

(7) の条件を満たさず、かつ次式 (8) の条件を満たすときに国内市場に売りの注文を出し、同時に国際市場に買いの注文を出す。

$$P_{MAX_k}(t-1) - P_k(t-1) < P_k(t-1) - P_{MIN_k}(t-1) \quad (8)$$

$$margin_{(k,j)} < 1 - P_{MIN_k}(t-1)/P_k(t-1).$$

このときのエージェント  $j$  の注文価格は  $P_k(t-1) \cdot (1 - margin_{(k,j)}/2)$  となる。注文量は、保有する通貨と Food の量から買えるだけ買い、売れるだけ売る。

通貨同士の取引は、通貨の保有量が理想的な保有量を下回るときに買い、上回るときに売る。 $k$  国の貿易エージェント  $j$  の通貨  $k^*$  の注文レート  $Bid.rate_{(k,j)}^{k^*}(t)$  は (9) 式ようになる。

$$Bid.rate_{(k,j)}^{k^*}(t) = \exp(\log \beta \cdot (1 - M_{(k,i)})) \cdot rate^{k^*}(t-1) \quad (9)$$

$$M_{(k,i)} = money_{(k,j)}^{k^*} / q_{(k,j)}^{k^*},$$

ここで、 $rate^{k^*}(t-1)$  は  $t-1$  期の通貨レートであり、 $money_{(k,j)}$  は通貨の保有量、 $q_{(k,j)}^{k^*}$  は理想的な通貨保有量、そして  $\beta$  は正の定数である。 $q_{(k,j)}^{k^*}$  は以下の式で求められる。

$$q_{(k,j)}^{k^*} = \frac{(1-\lambda) \cdot C_{(k,j,s)}^{k^*} \sum_{j=1}^N C_{(k,j)}^I(t) \cdot P_I(t-1)}{\sum_{j=1}^N C_{k,j}^I}. \quad (10)$$

#### 4.3 通貨取引エージェント

通貨取引エージェントは通貨の時間的な投機を行うエージェントである。つまり、通貨レートの安いときに買い、高いときに売ることによって利益を得ようとする。このエージェントは毎期、全通貨の組合せに対して売買注文を出す。つまり A, B, C という3種類の通貨がある場合には、A に対して通貨 B, C の買いの注文を出し、B, C についても同様な、全部で6通りの注文を出す。

通貨取引エージェントは過去の交換レートの履歴をもとに予想レートを求め、それを用いて注文レートを決定する。予想レートは全てのエージェントで同様に計算される。通貨  $k_1$  から通貨  $k_2$  に交換するときの予想レート  $F_{k_1}^{k_2}(t)$  は (11) 式ようになる。

$$F_{k_1}^{k_2}(t) = (1-\gamma) \cdot F_{k_1}^{k_2}(t-1) + \gamma \cdot R_{k_1}^{k_2}(t-1), \quad (11)$$

$R_{k_1}^{k_2}(t-1)$  は前期の通貨レートで、 $\gamma$  は正の定数である。通貨取引エージェント  $h$  の注文レート  $Bid.rate_{k_1}^{k_2}$  は (12) 式のように決定される。

$$Bid.rate_{k_1}^{k_2}(t) = F_{k_1}^{k_2}(t) \cdot (1 - margin_{(k,h)}), \quad (12)$$

ここで、 $margin_{(k,h)}$  は各エージェント毎に異なる正の定数である。各通貨の保有量が多いほど多く注文する。 $Bid.amount_{k_1,h}^{k_2}(t)$  は通貨取引エージェント  $h$  が通貨  $k_1$  で通貨  $k_2$  を買うときの注文量であり、以下の式で表せる。

$$Bid.amount_{k_1,h}^{k_2}(t) = amount_{k_1,h} / (CN - 1), \quad (13)$$

ここで、 $amount_{k_1,h}$  は通貨取引エージェント  $h$  の保有する通貨  $k_1$  の量である。 $CN$  は通貨の種類の数であり、国の数と等しい。つまり、通貨 A を通貨 B, C に対して売る場合、 $amount_{A,h}/2$  ずつ売りの注文を出す。

#### 5. 価格決定

市場の価格決定にはいろいろな方法が考えられるが、このモデルでは2種類の方法を用いる。一つは、国内市場での Food の取引と通貨市場での価格決定に用いられる方法である。これらの市場は、各エージェントから注文を集め、需要と供給が均衡するように価格を決定し、エージェントに市場価格を知らせる。取引が成立しなかった場合には前期の価格を知らせる。もう一つは、国際市場の Food 市場に用いられる価格決定方法である。ここではエージェント同士が一對一で交渉する相対取引が行われる。この市場では、交渉相手がランダムに組み合わせられ

る。取引価格はそれぞれの組毎に異なり、売り手と買い手の注文価格の中間の値が最終的な取引価格となる。各エージェントが1期に交渉できる回数は1回までである。

## 6. シミュレーション設定

人工国際貿易市場は X-Economy system を用いて実装された [13,14,15]。シミュレーションは、導入するエージェントの組合せを変えた複数の設定で行う。設定1には生産エージェントと、貿易エージェントが存在し、設定2には生産エージェントと貿易エージェントと通貨取引エージェントが存在する(表2)。貿易エージェントと、通貨取引エージェントの設定で行わないのは、貿易エージェントがいなければ、通貨に対する実需がないので通貨レートが変動せず、投機的取引を行う誘因がないためである。国家数は3で、3つの国の生産力は全く等しい。つまり、A国に存在する生産エージェント全く同じパラメータの生産エージェントがB国とC国にも存在する。表3は生産エージェントの生産力と貿易エージェントと通貨取引エージェントの *margin* の値の表である。各国には表3、のNo. 1~10のエージェントがそれぞれ存在する。Food 価格の初期値はA国を100、B国を101、C国を102とし、各通貨の交換レートの初期値は全て1.0とする。Food 価格の初期値を等しくしない理由は、各国の価格差がなければ貿易エージェントが取引する誘因がなくなるためである。シミュレーション期間は設定1、設定2共に10,000期行った。その他の重要なパラメータは表4の通りである。

## 7. 結果と考察

シミュレーションは設定1、2共に10試行ずつ行った。基軸通貨国は各試行毎に変わった。その原因は、国際市場のFood取引では取引相手がランダムに決定されるためである。ここでは基軸通貨とは国際市場で最も多く使用されている通貨と定義する。

### 7.1 基軸通貨の創発

図3は設定1(通貨取引エージェントなし)で、図4は設定2(通貨取引エージェントあり)で行われたシミュレーションの結果得られた各国の生産エージェントの持つ通貨信用度の平均の変化である。通貨取引エージェントあり・なしのどちらの設定でも、最終的には特定の国の通貨の信用度が最も高くなる現象が見られた。図3、4では、それらの中で代表的な結果を示し、A国の通貨の信用度が最高となるように表示した。

表2 シミュレーション設定

	生産 エージェント	貿易 エージェント	通貨取引 エージェント
設定1	あり	あり	なし
設定2	あり	あり	あり

表3 生産エージェントの生産力と貿易エージェントと通貨取引エージェントの *margin* の値

生産力			Margin	
No.	Food	通貨	No.	<i>margin</i>
1	9	3600	1	0.01
2	12	3300	2	0.05
3	15	3000	3	0.09
4	18	2700	4	0.13
5	21	2400	5	0.17
6	24	2100	6	0.21
7	27	1800	7	0.25
8	30	1500	8	0.29
9	33	1200	9	0.33
10	36	900	10	0.37

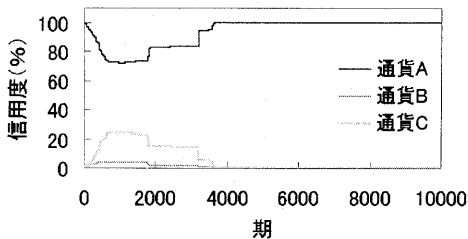
表4 各エージェントのパラメータ設定

生産エージェント	
Reserve level:	300
初期通貨保有量:	30000
初期 Food 保有量:	300
1期当たり Food 消費量:	10
$\alpha = 5 \times 10^{-5}$	
$b_{00} = 4$	
$b_{01} = 8$	
$b_{0\infty} = 16$	
貿易エージェント	
初期通貨保有量:	10000
初期 Food 保有量:	0
閾値 T:	10%
$\lambda$ :	30%
$\beta = 1.5$	
通貨取引エージェント	
初期通貨保有量:	各 10000
$\gamma = 0.03$	

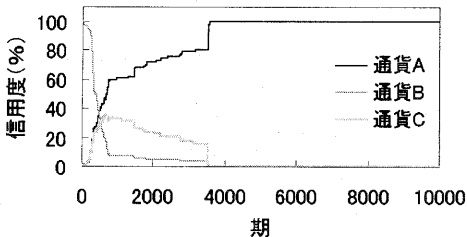
図7、8は国際市場において各通貨で取引されたFoodの量の総和である。設定1、2共に通貨Aの取引量の総和が増加していくのに対して、通貨B、Cの取引量は約1,000期以降ほとんど増えていない。国際市場で最も多く取引に使用される通貨Aが設定1、2共に基軸通貨となる。

この図からは、設定2での基軸通貨の取引量が安定して増加しているのに対し、設定1では取引量が非常に不安定で、取引量も $10^{-1}$ 程度しかないことがわかる(図7のスケールは図8の $10^{-1}$ である)。な

A 国の生産エージェント



B 国の生産エージェント



C 国の生産エージェント

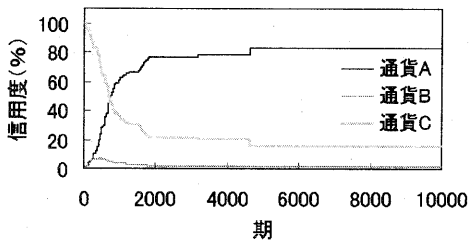
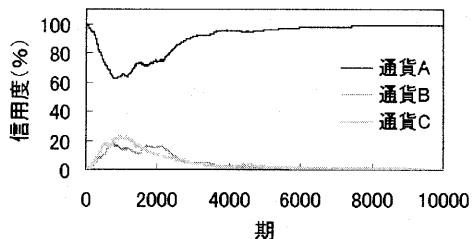
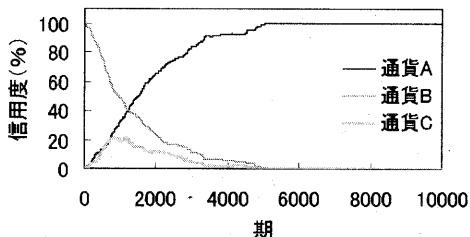


図3 通貨取引エージェントなしの場合の  
各国の生産エージェントが持つ通貨  
信用度の平均の変化

A 国の生産エージェント



B 国の生産エージェント



C 国の生産エージェント

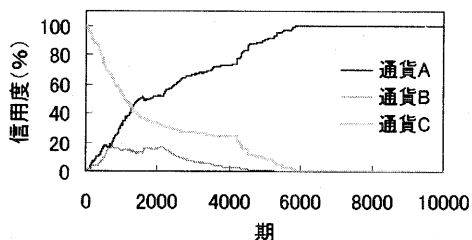


図4 通貨取引エージェントありの場合の  
各国の生産エージェントが持つ通貨  
信用度の平均の変化

ぜ市場の安定性に違いが現れたのかを次に考察する。

## 7.2 通貨レートと市場価格の安定性

通貨レートの収益率の標準偏差、つまり通貨レートの不安定さを表5に示す。通貨レートA/Bは通貨Bに対する、通貨Aのレートである。この表から、設定1よりも設定2の方が標準偏差が小さく通貨レートが安定していることがわかる。通貨 $k$ の $t$ 期の収益率は次式で計算される。

$$P_k(t) = \frac{P_k(t) - P_k(t-1)}{P_k(t-1)} \quad (14)$$

各国のFood価格の収益率の標準偏差を表6に示す。国内市場も通貨レートと同様設定2の方がFood価格が安定している。設定1の場合、通貨は実需的な取引のみが行われるので、需給が偏りやすく通貨レートが不安定になる。通貨取引エージェントはレート

が高いときに売り、安いときに買う介入のような働きをし、通貨レートを安定させたと考えられる。通貨取引エージェントはFoodの取引を行わないので、設定1でみられたFood価格の不安定さは通貨レートの不安定によるものである。貿易エージェントは各国のFood価格を比較する際に自国の通貨レートに換算する。設定1では通貨レートが適切な値に収束しないので、他国のFood価格を過大に、あるいは過小に評価してしまう。その結果、価格の高いところから安いところへ商品が売られ、各国の価格が均衡するという貿易本来の機能が働かず国内市場が不安定になったと考えられる。

## 7.3 取引量の安定性

表7は通貨市場での1日当たりの各通貨の取引量を示したものである。A/Bは通貨Aと通貨Bの取

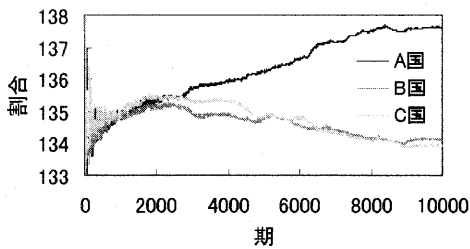


図5 通貨と Food の生産割合 (設定2)

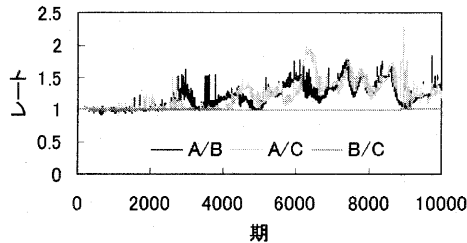


図6 通貨の交換レート (設定2)

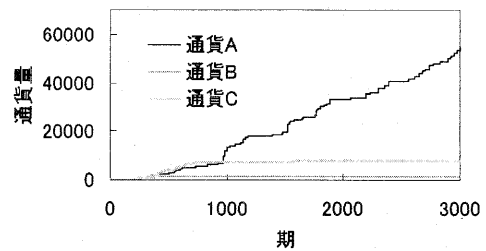


図7 国際市場における各通貨での Food の取引量の累積 (設定1)

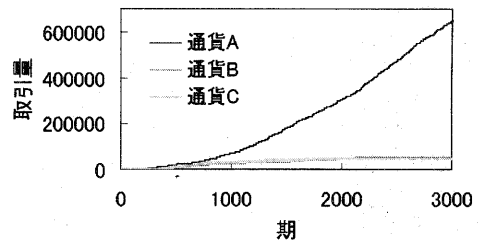


図8 国際市場における各通貨での Food の取引量の累積 (設定2)

引における通貨 A の取引量を表す。この表からは設定2の方が取引量が多いことがわかる。設定1では、通貨は実需的な取引のみ行われるため、売り手がない、あるいは買い手が見つからないということが頻繁に起こり取引が成立しにくい。一方設定2では通貨取引エージェントが每期注文を出すので、取引が成立しやすい。

表8は国際市場と各国国内市場における1日当たりの Food の取引量を示したものである。通貨の取引量同様、国際市場、国内市場共に設定2の方が取引量が多い。したがって、設定1よりも設定2の方が Food の輸出入が活発に行われている。設定1は、通貨レートが不安定なため、Food の価格が高いときに貿易エージェントがさらにそれを上げることが起こり得る。したがって需給のバランスがとれず取引が成立しにくくなったと考えられる。一方、設定2は通貨取引エージェントが通貨レートを安定させ、国内の Food 価格も安定するので、需要と供給の均衡がとれて取引量が多くなった。

表9は国際市場と各国国内市場における Food の取引量の標準偏差の値を示したものである。C国を除いて、設定2の方が概ね標準偏差が小さい。つまり、設定2の方が国際市場、国内市場共に Food の取引が安定して行われている。

#### 7.4 生産傾向の変化

図5は設定2の各国の生産エージェントによる財の生産割合で、 $k$  国の生産割合  $ratio_k$  は以下の式で計算される。

$$ratio_k = \frac{\sum_t \sum_i production_{k,i}^c(t)}{\sum_t \sum_i production_{k,i}^f(t)}, \quad (15)$$

ここで、 $production_{k,i}^c(t)$  は  $t$  期に  $k$  国の生産エージェント  $i$  によって生産された通貨の量で、 $production_{k,i}^f(t)$  はそのときの Food の量である。約1,000期までは生産割合が激しく変動するが、2,500期あたりから基軸通貨国の生産割合がその他の国の生産割合を上回った。(15)式によって求められる生産割合の値が大きいということは通貨の生産傾向が強いということである。設定2では10試行中全てにおいて、機軸通貨国の生産割合がその他の国の生産割合を上回った。生産割合の差は大きくはないが、はっきりとした傾向を示しており、基軸通貨国が通貨を生産し、その他の国が Food を生産するという役割が生まれたといえる。一方、設定1で基軸通貨国の生産割合がその他の国を上回ったのは10試行中3回だけであった。

設定2においてA国の通貨の生産割合がその他の

表5 通貨レートの収益率の標準偏差

	A/B	A/C	B/C
設定1	1.0505	393.90	0.2223
設定2	0.0316	0.0315	0.0058

表6 各国のFood価格の収益率の標準偏差

	A国	B国	C国
設定1	16.813	7.6216	2.1425
設定2	0.0575	0.1174	0.1228

表7 各通貨の1日当たりの取引量

	A/B	A/C	B/C
設定1	15418.65	88.72	12.32
設定2	33780.74	27348.83	727.97

表8 各市場におけるFoodの1日当たりの取引量

	国際市場	A国	B国	C国
設定1	35.47	44.74	53.53	75.68
設定2	229.94	75.86	76.30	76.63

表9 各市場におけるFoodの取引量の標準偏差

	国際市場	A国	B国	C国
設定1	589.50	74.65	96.53	32.68
設定2	367.94	36.43	40.70	41.15

国よりも大きくなった理由は次の通りである。A国の通貨の信用度が上がり、貿易エージェントによる通貨Aの需要が増え、通貨Aのレートが通貨B, Cに対して高くなった(図6)。すると、相対的にA国のFood価格は高くなり、A国のFoodの輸入が多くなる。したがって、A国へのFoodの供給が増え、A国の国内市場価格が下落する。国内での市場価格が下がっても、通貨Aのレートは貿易エージェントの需要に支えられて高いままなので、輸入され続ける。その結果、A国での通貨の生産割合が増加した。反対にFoodの輸出を続けるB, C国ではFoodの供給が不足するのでFoodの生産が増加した。

## 8. おわりに

本研究では、人工国際貿易モデルに導入するエージェントの組合せを変えることにより、市場の振る舞いがどのように変化するかを考察した。通貨取引エージェントを導入することで通貨レートと市場価格が安定し、取引量も安定した。また、生産力が等しいにもかかわらず生産傾向に違いが現れ、基軸通貨国とその他の国の間に生産の役割が生じた。実験の結果は、通貨取引の投機的な取引は通貨レートそのものを安定させるだけでなく、国内市場の価格

や取引量も安定させ、さらには生産の特化が起こることを示している。今後の研究の方向としては、より近代的な金融システムにモデルを発展させることや、貿易を行うのに必要な空間的な移動を扱えるように、モデル全体を空間的に広がりを持たせるように拡張し、空間的要素・時間的遅れなどの効果を検証することなどが挙げられる。

## 文献

- [1] Yasutomi, A.: The emergence and collapse of money, *Physica D*, Vol. 82, pp.180/194 (1995).
- [2] 長谷川敦士, 植田一博: 人工社会における貨幣交換, 情報処理学会研究報告, Vol. 2000, No. 3, pp. 27-34 (2000).
- [3] 須田美矢子: ゼミナール 国際金融入門, 日本経済新聞社, (1996).
- [4] 佐々木雄一, 川村秀憲, 大内東, 車谷浩一: X-Economy システムを用いた人工国際市場における基軸通貨の発生に関する研究, 2001年度日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp254-255 (2001).
- [5] 佐々木雄一, 川村秀憲, 大内東, 車谷浩一: 人工市場における国際取引と基軸通貨の創発に関する研究, *SICE 2001*, 105D-6.
- [6] Y. Sasaki, T. Yamashita, H. Kawamura, K. Kurumatani, A. Ohuchi: Emergence of Key Currency in International Trade - Medieval Times Model of World Trade League, to appear in the Proc. of CIEF'02.
- [7] T. Yamashita, Y. Sasaki, H. Kawamura, K. Kurumatani, A. Ohuchi: Emergence of Key Currency by Interaction among International and Domestic Markets - Medieval Times Model of World Trade League, submitted to AAMAS'02.
- [8] K. Steiglitz, M. L. Honig, and L. M. Cohen: A Computational Market Model Based on Individual Action, Chapter 1 in *Market-Based Control, A Paradigm for Distributed Resource Allocation*, Scott Clearwater (ed.), World Scientific, Hong Kong (1996).
- [9] K. Steiglitz and D. Shapiro: Simulating the Madness of Crowds: Price Bubbles in an Auction-Mediated Robot Market, *Computational Economics*, vol. 12, pp. 35-59, 1998.
- [10] H. Mizuta, K. Steiglitz and E. Lirov: Effects of Price Signal Choices on Market Stability, 4th Workshop on Economics with Heterogenous Interacting Agents, 1999.
- [11] 水田秀行: エージェントが行うマーケットシミュレーション: コンピュータでバブルの発生を見よう, 情報処理, Vol. 40, No. 10, pp. 1022-1027 (1999).
- [12] 水田秀行, K. Steiglitz, E. Lirov: マーケットの安定性と価格シグナル, 情報処理学会研究報告 (2000).
- [13] 川村秀憲, 山本雅人, 大内東, 車谷浩一: X-Economy サーバによる仮想金融市場の設計と開発, 情報処理学会研究報告, Vol.2001, No1, pp.61-65.
- [14] H. Kawamura, M. Yamamoto, A. Ohuchi and K. Kurumatani: Development of X-Economy system for Introduction of Artificial Market, The Proceedings of the First International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems, pp.51-58 (2001)
- [15] A. Sashima and K. Kurumatani: Toward a standard communication protocol for artificial economy, submitted to AAMAS'02, 2002.