知 能 と 複 雑 系　110－10
（1998.　1.　22）

市場指向計算モデルと複雑系

佐々木　隆師，生天目　章
防衛大学校　情報工学科
神奈川県横須賀市走水1-10-20　防衛大学校　情報工学科
E-Mail: sasaki@cc.nda.ac.jp,nama@cc.nda.ac.jp

あらまし 自律的な計算を実行することができるエージェントが，思いやりの概念に基づき，個々に合理的な計算を実行するプロセスを市場指向計算モデルとして提案する．全体を統治する管理機構が存在しない市場メカニズムの下で，思いやり又は社会性に基づき，それぞれのエージェントが自由な競争を行なうことで，いわゆる神の見えざる手により，マルチエージェント全体として最良の均衡状態が形成されることを示す．また，各種シミュレーションによって，市場指向計算モデルの収束性や安定性について明らかにする．さらに，思いやりや社会性に関する学習の仕方によって，エージェント集団はさまざまな様相を呈することを明らかにし，また，異なるタイプのエージェントを組み合わせることで構成される異質なエージェント集団の集合行為の複雑系としての性質も明らかにする．

キーワード　市場指向，複雑系，協調計算

A market-oriented programing and it's complexity

Takanori Sasaki, Akira Namatame
Department of Computer Science,Japan Defence Academy
Department of Computer Science, Japan Defence Academy, Hasirimizu 1-10-20 Yokosuka
E-Mail: sasaki@cc.nda.ac.jp,nama@cc.nda.ac.jp

Abstract

Summary: This paper describes the research of studying self-interested behaviors leading to optimal behaviors. We term such an agent with both a selfish-interest and a social competence as a rational agent. The unified model of the competitive interactions among rational agents under the market mechanism is developed, We provide the concept of the cooperative computation among rational agents that emerge a social optimal solution.

key words　Market mechanism , Complexity , Cooperative computation

1　はじめに

独自の理念や目的の担い手である主体が，その主体性や自律性を外部から抑制されることなく，自己実現を目指した行為を追求することができる場合，自律的であるという．また自己の目的や効用を最適にするための動作や行為を一貫性をもって追求する場合，合理的な主体という．独自の理念や目的をもつ複数の合理的で自律した主体が集まって集団を形成し，その中で相互依存関係をもって共存することにより，競争が生まれることになる．個々に自己実現を目指す合理的な主体の行為を競争原理に基づく行為というが，それらの競争的行為をとることで，集団としての協調を生み出すための動機や誘因が生まれるものと思われる．すなわち，協調原理に基づく集団レベルで合理的な行為と比較すると，競争原理に基づき自己の目的や効用を最適にする個人レベルで合理的な行為によって獲得できる効用は一般に低くなる．個々の主体の個人レベルでの合理性に基づく行為によって，集団全体にとって最適な状態が実現されないことを集団のジレンマともいう．そして，このようなジレンマを解決するために，主体が個々に創意工夫して行動することが，集団として最適な状態を生み出すための源泉になるものと思われる．

本論文では，自律的な計算をする多数の計算主体（以下エージェントと呼ぶ）による協調計算を考える．個々のエージェントは，独自の効用関数をもって，それを最適にするための計算処理を自律的に行うことのできる計算主体とする．自己の効用関数を最適にする動作を実行をするために，他エージェントと競争する中で，他エージェントの効用関数に及ぼす自己の動作の影響を考慮し自己の動作を決定するプロセスを協調計算モデルとして定式化し．その性質について明らかにする．

ところで，他のエージェントのとる行為が自己の効用に及ぼす影響について考慮しながら，自己の合理的な動作を決定するモデルは，競争解（ナッシュ解）に収束する．しかしながら，そのような競争解は集団全体にとって最適な均衡解ではない．したがって，エージェントの個人レベルでの合理的な行為がもたらす非合理性の罠を脱出し，集団として最適な均衡解をもたらす協調的行為を創発するための仕組みを生み出す必要がある．その仕組みとして，個々のエージェントに，社会性や思いやりの概念に基づく自己言及的な計算プロセスを導入する．エージェントは集団の一員としての自己の存在を意識することとし，そのことは自己の行為が集団全体や他エージェントに及ぼす影響について考慮する．そして，その影響を自己モデルの一部として内在化して，自己の行動を決定することを意味する．その内在化とは，すなわちそのような自己言及行為とは，それらの影響を自己の効用関数に反映し，そして修正された効用関数の下で自己の合理的な行為を選択する．そのことで，たとえ個人レベルでの合理性を追求した競争的行為を選択しても，非合理性の罠を脱出することができることを示す．また，自己の効用関数を最適にするための合理的な計算をする上で個々のエージェントは，自己の行為が他エージェントに及ぼす影響について考慮することで，自己の社会的行為，あるいは他エージェントへの思いやりによる行為をとる．そのような自己規制的な行為は，個人レベルの観点からは，非合理的な行為を意味するが，そのような思いやりや社会性の概念に基づき，個々のエージェントが動作をすることで集団全体としては最適な協調解を実現できることを示す．

そしてそのような思いやりによって導かれる均衡解を暗黙の協調解とも呼ぶ．そして暗黙の協調解が実現されるための仕組みについて分析をする．個々のエージェントは，協調的動作をとることによって獲得することができる余剰効果（協調効果）に関する私的所有権を放棄する．そして，それを集団全体のものとして相互に認め合うという条件の下で，個人合理性を満たす競争的な動作によって，集団全体として最適な均衡解が実現されることを明らかにし，また暗黙の協調計算モデルの安定性，収束性の性質について複雑系の観点から分析する．

2　マルチエージェントによる資源配分問題と暗黙の協調

本節では，市場メカニズムの下でのマルチエージェントによる資源配分に関わる問題を定式化する．自由な競争原理が働く市場を通じて，個々のエージェントは必要な資源の獲得や供給を行う．各エージェントは市場情報を共有し，そして個々に自己の効用関数を最適にする動作を決定する．そして，その場合の相互依存的な動作を戦略的意思決定問題として定式化し，その競争解と協調解とを求める．

各エージェントが供給する財やサービス（以下，行動戦略という）に対する価値は，他のエージェントが供給量にも影響を受けるものとし，それを市場価格関

数として$P_i\{x_i, x(i)\}$で表す．エージェントA_iの供給量をx_i，エージェントA_i以外の他エージェントの供給量を$x(i) = (x_1, \mathrm{L}\ , x_{i-1}, x_{i+1}, \mathrm{L}\ , x_n)$として記述する．エージェント$A_i$の効用関数を，自己の行動戦略$x_i$とその市場価格関数$P_i\{x_i, x(i)\}$の積として，次式で定義する．

$$U_i\{x_i, x(i)\} = x_i P_i\{x_i, x(i)\} \quad i = 1, 2, \ldots, n. \quad (2.1)$$

また，(2.1)式の市場価格関数が，一次関数として

$$P_i\{x_i, x(i)\} = a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j \qquad (2.2)$$

で与えられる場合の競争解と協調解とを求める．この場合の競争解は，

$$\begin{aligned} \partial U_i\{x_i, x(i)\} / \partial x_i &= a_i - \sum_{j \neq 1}^{n} b_{ij} x_j - 2 b_{ii} x_i \\ &= 0 \qquad i = 1, 2, \mathrm{L}\ , n \end{aligned} \qquad (2.3)$$

を同時に満足する解として与えられる．そして(2.3)式を解くと自己の効用関数を最適にする行動戦略を反応関数として，次式で求めることができる．

$$\phi_i(x(i)) = (a_i - \sum_{j \neq i}^{n} b_{ij} x_j) / 2 b_{ii} \qquad (2.4)$$

次に，エージェントの効用関数の総和によって集団共通の効用関数として定義する．すると協調解は，

$$S(x_1, \ldots, x_i, \ldots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} U_i\left\{x_i, x(i)\right\} \qquad (2.5)$$

を最適にする解として与えられる．そして協調解，あるいは集団の合理性を満たす行為は，

$$\begin{aligned} \partial S / \partial x_i &= \partial U_i / \partial x_i + \sum_{j \neq i}^{n} \partial U_j / \partial x_i \\ &= 0 \qquad i = 1, 2, \ldots, n. \end{aligned} \qquad (2.6)$$

を同時に満たす解として求められる．

ここで，自己の行為が他のエージェントに及ぼす影響を自己の価値体系に内在化することを合理的なエージェントの自己言及行為と定義する．そのような自己言及行為によって，個々のエージェントは(2.1)式で定義した自己の効用関数を次式のように修正をするものとする．

$$\begin{aligned} &\overline{U}_i\{x_i, x(i)\} \\ &= U_i\{x_i, x(i)\} - \lambda_i\{x_i, x(i)\} x_i \quad i = 1, 2, \ldots, n. \end{aligned} \qquad (2.7)$$

以上の式で$\lambda_i\{x_i, x(i)\}$を思いやり（又は暗黙の協調）係数として定義する．

(2.7)式で修正された効用関数を同時に最適にする解，すなわち，個々のエージェントの自己言及行為によって修正された効用関数の組によって定義される競争解が，修正されない元の効用関数の総和を最適にする協調解と一致するための条件を求める．(2.7)式の限界効用関数は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} &\partial \overline{U}_i\{x_i, x(i)\} / \partial x_i \\ &= \partial U_i\{x_i, x(i)\} / \partial x_i - \lambda_i\{x_i, x(i)\} - x_i \partial \lambda_i\{x_i, x(i)\} / \partial x_i \end{aligned} \qquad (2.8)$$

ここで，思いやり係数が他エージェントの行為だけに依存する関数とすると（その場合，$\lambda_i\{x(i)\}$で表す），(2.8)式より，

$$\partial \overline{U}_i\{x_i, x(i)\} / \partial x_i = \partial U_i\{x_i, x(i)\} / \partial x_i - \lambda_i\{x(i)\} \qquad (2.9)$$

を得る．修正されない元の効用関数の総和を最適にする協調解は，(2.6)で与えられることから，修正された効用関数の下での競争解は，

$$M_i\left\{x_i, x(i)\right\} - \lambda_i\{x(i)\} = 0 \quad i = 1, 2, \ldots, n. \quad (2.10)$$

を同時に満足する解として求められる．したがって，思いやり係数が，

$$\lambda_i\{x(i)\} = \sum_{j \neq i}^{n} \partial U_i(x_j, x(j)) / \partial x_i \quad i = 1, 2, \ldots, n. \qquad (2.11)$$

の条件を満足するならば，(2.7)式の修正された効用関数の組に定義される競争解は，修正されない元の効用関数の組の協調解と一致することがわかる．例えば個々の効用関数が，(2.2)式の市場価格関数で構成される2次関数で与えられる場合には，思いやり係数は，次式で与えられる．

$$\begin{aligned} \lambda_i\{x(i)\} &= \sum_{j \neq i}^{n} \partial U_j\{x_j, x(j)\} / \partial x_i \\ &= -\sum_{i \neq j}^{n} b_{ji} x_j \end{aligned} \qquad (2.12)$$

各エージェントは，あくまでも自己の合理性を追求した動作をする中で，それが集団合理性の条件を満足するようになるための条件を求めたが，各エージェントの競争的動作によって，集団全体として調和のとれ

た協調的動作が創発される仕組みとは何であろうか．思いやり係数 $\lambda_i\{x(i)\}$ は，エージェント A_i, $i=1,2,\ldots,n$, の動作が集団を構成する他エージェントに及ぼす影響を表し，集団の効用関数の一部としての役割を果たしている．すなわち，各エージェントの修正された効用関数は，

（1）エージェント A_i, $i=1,2,\ldots,n$, の私的な効用 $= U_i\{x_i, x(i)\}$

（2）エージェント集団の共通の効用 $= \lambda_i\{x(i)\}x_i$

の2項目から構成される効用関数であると考えることができる．すなわち，私的な効用と集団共通の効用の両方に価値を見いだし，各エージェントは競争的な動作をすることにより，協調解を実現することができる．

3 市場メカニズムの下での協調計算モデル

本節では，思いやりや社会性の概念に基づく市場メカニズムの下での合理的な計算プロセスを協調計算モデルとして定式化する．思いやり係数 λ は，エージェントが個々に自律的な動作をしたとしても，そのような分権的行為の集合体が，集団全体の共通の制約条件を満たすための働きをする．また思いやり係数 λ の下で，個々のエージェントが個人的に合理的な動作をしたとしても，そのような利己的な動作の集合体が集団としての最適性を保証するための働きをしている．すなわち各エージェント A_i, $i=1,2,\ldots,n$, は，思いやり係数 λ によって他のエージェントへ及ぼす影響度計算し，それに基づき次の方法で自己の行為を逐次改善するプロセスとして協調計算を以下の式で定義する．

$$\begin{aligned}&\mathit{If}\ M_i(x_i, x(i)) - \lambda_i\{x(i)\} < 0\ \mathit{then}\ x_i := x_i - \delta_i\\&\mathit{If}\ M_i(x_i, x(i)) - \lambda_i\{x(i)\} > 0\ \mathit{then}\ x_i := x_i + \delta_i\end{aligned} \tag{3.1}$$

すなわちエージェント A_i は，自己の限界効用関数 $M_i\{x_i, x(i)\}$ と自己の動作が他のエージェント A_j, $j \neq i$ の限界効用関数に及ぼす影響度との大小関係に基づき自己の行為を逐次計算をする．ところで，(3.1)式で与えた協調計算プロセスの収束点は，(2.10)式の条件式を満足することから協調解であることがわかる．さらに，(3.1)式の計算プロセスにおいて，自己の行為が他のエージェントの効用関数に及ぼす影響度を考慮しない場合は，思いやり係数 $\lambda_i\{x(i)\}$, $i=1,2,..,n$, をゼロとした場合である．その場合の収束点は，(2.3)式の解に収束することから，修正されない効用関数の組に定義される競争解になる．

次に，(2.6)式の均衡式を x_i について陽に解いた式を $x(i)$ の反応関数として，$\psi_i(x(i))$ で表わす．すなわち，$\psi_i(x(i))$ は次式を満たす．

$$\psi_i(x(i)) = \arg \underset{x_i}{Max}[U_i\{x_i, x(i)\} - \lambda_i\{x(i)\}] \tag{3.2}$$

$$M_i\{\psi_i(x(i)), x(i)\} - \lambda_i\{x(i)\} = 0 \qquad i=1,2,\ldots,n. \tag{3.3}$$

ここで，このモデルの収束性について考察すると，それは各エージェントの反応関数の性質によって決定される．そして，各エージェントの反応関数の集合 $\psi(x) = \{\psi_1(x(1)),\ldots,\psi_i(x(i)),\ldots,\psi_n(x(n))$ に定義される $n \times n$ のJacobian行列の均安定性の条件によって決まる．その十分性に関する条件は，以下の式で与えられる．

$$\left|\sum_{j\neq i}^{n} \partial\psi_j(x(j))/\partial x_i\right| < \left|\partial\psi_i(x(i))/\partial x_i\right| \quad i=1,2,\ldots,n \tag{3.4}$$

特に，市場価格ルールが(2.2)式の一次式で与えられる場合は，相互作用行列に関する行列 $(B+B')$ の安定性によって決まる．そしてそれが安定行列であるための十分条件は，以下の式で与えられる．

$$\sum_{j\neq i}^{n}(b_{ij} + b_{ji}) < 2b_{ii} \quad i=1,2,\ldots,n \tag{3.5}$$

(2.2)式の市場価格ルールが，この条件式を満足している場合を，安定系の市場，それを満たさない場合を不安定系の市場と呼ぶことにする．

(3.1)式における調整量，δ_i, $i=1,2,..,n$, を定めることで，協調アルゴリズムとして定式化する．ある時点 t におけるエージェント A_i の動作を $x_i(t)$ 及びエージェント A_i 以外の動作を $x(i,t) = (x_1(t),\ldots,x_{i-1}(t), x_{i+1}(t),\ldots,x_n(t))$ で表す．エージェント A_i は，次のような調整量 δ_i を定め，次の時点 $t+1$ における動作を決定するものとする．すなわち，

$$\begin{aligned}\delta_i &= x_i(t+1) - x_i(t)\\&= (\alpha_i / b_{ii})[M_i\{x_i(t), x(i,t)\} - \lambda_i\{x(i,t)\}]\end{aligned} \tag{3.6}$$

ここで(3.6)式を整理することによって，局所動作モデルは，次のように定式化できる．

$x_i(t+1)$
$= (\alpha_i / b_{ii}) P_i(t) + (1-\alpha_i) x_i(t) - (\alpha_i / b_{ii}) \lambda_i \{x(i,t)\}$

(3.7)

また，思いやり係数においても，(3.1)式の関係式を用いて次のようにして調整する．

$\lambda_i(t+1)$
$= \beta_i [M_i\{x_i(t), x(i,t)\} - \lambda_i\{x(i,t)\}] + \lambda_i\{x(i,t)\}$

(3.8)

さらに，(2.12)式の関係式を用いることで思いやり係数の調整を，次式で行なう．

$$\lambda_i(t+1) = \beta_i\{P_i(t) - b_{ii} x_i(t)\} + (1-\beta_i)\sum_{j \neq i}^{n} b_{ji} x_j(t) \quad (3.9)$$

ところで，自己の行為が他エージェントに与える影響を正確に知ることは一般に困難である．すなわち，(3.9)式では各エージェント A_i , $i = 1,2,...,n,$ が各係数 b_{ji} , $j = 1,2,...,n$, $j \neq i$ を知ることは困難である．そこで，個々のエージェントは相互に与える影響が対称的である，すなわち自己の行為が他エージェントから受ける影響と他エージェントに自己の行為が与える影響の度合いは対称であると仮定をすることで，自己の行為が他エージェントに与える影響を自己の行為が自分自身に与える影響の比から推定するものとする．そして，自己の行為が他のエージェントに対して及ぼす影響度は，自分自身に与える影響度の k 倍であると仮定することで次式を得る．

$$b_{ji} / b_{ii} = k \quad (0 < k \leq 1), \ j = 1,2,...,n, \ j \neq i \quad (3.10)$$

(3.10)を用いることで，思いやり係数に関する調整式である(3.9)式は次式で与えられる．

$$\lambda_i(t+1) = \beta_i\{P_i(t) - b_{ii} x_i(t)\} + (1-\beta_i) b_{ii} k \sum_{j \neq i}^{n} x_j(t) \quad (3.11)$$

(3.7)式において，α_i を各エージェントの行動戦略の更新速度，また(3.11)式における β_i を思いやり係数の学習速度，そして k を相互依存係数と呼ぶ．さらに，(3.7)式の最終項における k の値がゼロに近づくほど競争解に近づくことがわかる．

次に，暗黙の協調計算モデルは，その式の特性において，α_i 及び β_i の値の違いによってエージェントをさまざまなタイプに分類する．以下にその代表的な例を挙げ，局所動作プロセスに基づくシミュレーションによって，異なる更新速度の組み合わせをもつエージェントの局所的動作の挙動について明らかにする．以下のように，パラメータを設定することでシミュレーションを実行する．

（使用言語：Java，実行環境：Power Macintosh）
（1）エージェント数：30
（2）市場価格ルール：a_i=300, b_{ii}=1, b_{ij}=0.01
（3）行動戦略の初期値：5

タイプ1：（$\alpha_i \approx 0$）の場合

この場合には，(3.7)式の調整モデルは

$$x_i(t+1) \approx x_i(t) \quad (3.12)$$

となる．したがって，α_i が0に近づくほど市場価格に非常に鈍感であり，自己の行動戦略の更新が非常に遅く，当初の自己の行動戦略に固執する．そして，他エージェントに対する影響を考慮することのないエージェントといえる．

（ケース1 α_i=0.1，β_i =0.1の場合）

各エージェントの市場価格及びすべてのエージェントの行動戦略の総和，すなわちエージェントが市場に供給する財やサービスなどの資源の供給量の総和とし，協調計算モデルの局所動作プロセスによる協調解への収束性を示す．また $k = 0$ とした場合，すなわち競争解への収束と比較する．

・協調解　　　　　　　　・競争解

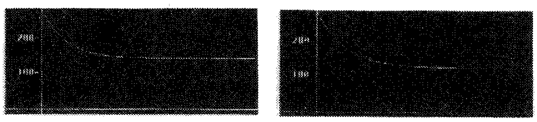

図 1　各エージェントの市場価格の変化

・協調解　　　　　　　　・競争解

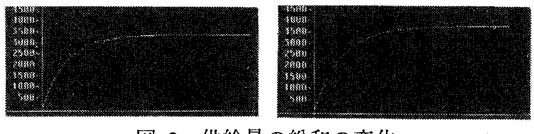

図 2　供給量の総和の変化

（ケース2 α_i=0.1，β_i =0.9の場合）

この場合は，各エージェントの思いやり係数の更新は非常に速いため，その時点での市場価格から過剰に自己抑制する．したがって均衡解への収束は遅くなる．

・協調解　　　　・競争解

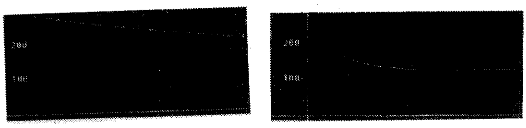

図 3　各エージェントの市場価格の変化

・協調解　　　　・競争解

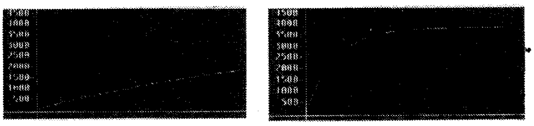

図 4　供給量の総和の変化

以上のそれぞれのケースから，タイプ1の場合は，その更新速度及び学習速度の値により全般にゆっくりと均衡状態に収束していくことがわかる．各エージェントは思いやり係数によって自己の行動を調整することで集団全体として最適な協調解へ収束することが分かる．またその思いやりがない場合には異なる均衡解，すなわち競争解へ収束することが分かる．そして，思いやり係数によって自己規制することから，その均衡状態においても自己の行動戦略をそれぞれ自律的に少なくし，その分価格が高くなる．その結果として，個々のエージェントひいては集団全体として得られる効用は，競争解の場合より必ず高くなる．

タイプ2：（$\alpha_i \approx 1$）の場合

この場合には，調整モデルは次式で近似できる．

$$x_i(t+1) \approx (1-\beta_i)P_i(t)/b_{ii} + x_i(t) - (1-\beta_i)k\sum_{j=1}^{n} x_j(t) \quad (3.13)$$

このことから，市場価格に敏感に反応するいわば過剰反応型のエージェントを表わしているといえる．ただし，自己の内部において他エージェントへの影響を考慮し，自己規制をする．よって，他エージェントの行為に依存して自己の行動戦略を決定するエージェントといえる．

（ケース1 α_i=0.9，β_i =0.1の場合）

この場合は，安定系の条件を満たした市場であるが，思いやり係数の学習速度が遅いケースである．競争解（$k=0$）の場合も同じように発散する．

・協調解　　　　・競争解

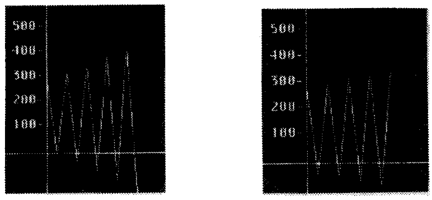

図 5　各エージェントの市場価格の変化

・協調解　　　　・競争解

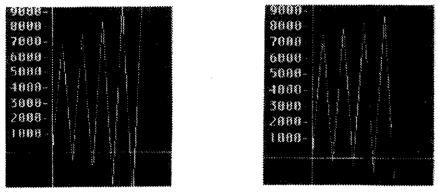

図 6　供給量の総和の変化

すなわち，エージェントの行動戦略の更新速度が速いと，過剰供給及び過小供給といった状況が生じ，協調解及び競争解とも不安定である．すなわち，更新速度の速いエージェントは不安定なタイプのエージェントともいえる．また，このような場合において思いやり係数の学習速度が遅い場合には，自己規制によるブレーキが働かず市場は発散することになる．

（ケース2 α_i=0.9，β_i =0.9の場合）

次に，思いやり係数の更新が非常に速い場合について示す．思いやり係数はその時点での市場価格に応じて，自己の行動戦略を抑制する働きがある．したがって，上記のケース1ように過剰供給や過小供給を行なうことなく安定して均衡解に収束することがわかる．ところが，競争解では発散する．すなわち不安定な市場モデルであっても，その思いやり係数の学習速度によって協調解は収束することがわかる．

・協調解　　　　・競争解

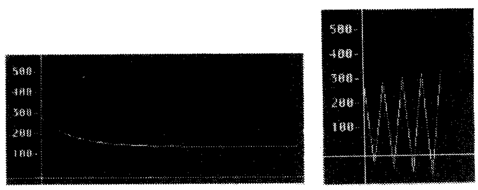

図 7　各エージェントの市場価格の変化

・協調解　　　　　　　　　　・競争解

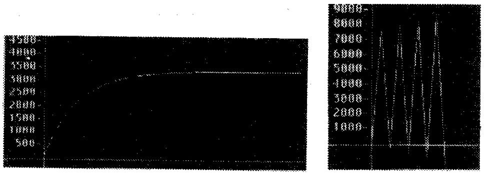

図 8　供給量の総和の変化

シミュレーション結果から明らかになったことは，行動戦略の更新速度が速くなるにしたがって市場が乱れていくことがわかる．しかし，タイプ２のケース２で明らかなように思いやり係数の学習速度を速くし，思いやりによって抑制することで安定的になる．そして，思いやり係数の学習速度の速い，すなわち他のエージェントの行動戦略に高い価値を見いだし，自己抑制するエージェントの集団においては安定的な市場であるといえる．

4　異なるタイプのエージェントが参加する市場

多数の異なるタイプのエージェントが関与する市場は，全体としてどのような様相を示すのであろうか．本節では，異なるタイプのエージェントが参加する市場の特性についてシミュレーションによって検証する．

まず，安定系において（すなわち，安定して協調解に収束する性質をもつ系において）市場価格の変化に適応し，自己の行動戦略を更新する，すなわちα_iが非常に速いエージェント集団は，前節のタイプ２のシミュレーションから明らかなように，過剰供給及び過小供給が交互に生じる不安定な市場である．ここで，前節と同様のシミュレーション環境において，市場価格ルールのパラメータをa_i=300，b_{ii}=1，b_{ij}=0.01とし，行動戦略の初期値を5とし，（α_i=0.9，β_i=0.1）とするエージェント数を10，そして非常に速い収束を示した（α_i=0.5，β_i=0.1）とするエージェント数を20混在させて，シミュレーションを実行した場合の市場の変化を下記に示す．

・協調解　　　　　　　　　　・協調解
（同質エージェント集団）（混質エージェント集団）

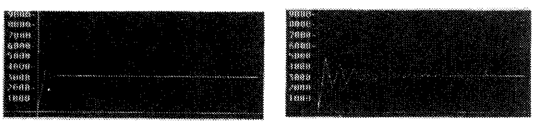

図 9　供給量の総和の変化

すなわち，α_i=0.5のみの場合においては非常に速い収束を示した市場が，更新速度の速いエージェントが混入することによって乱れることがわかる．またこのシミュレーションにおいて（α_i=0.9，β_i=0.1）のタイプのエージェント数を10のみで実行するとエージェント数30では発散していた市場が収束していることがわかる．このことから，協調計算において，そのプロセスの収束性は，市場に参加するエージェントの数にも影響を受けることがわかる．

次に，収束条件を満たしていない不安定系について検証する．市場価格ルールのパラメータをa_i=300,b_{ii}=0.5,b_{ij}=0.5とし，行動戦略の初期値を5，エージェント数を30とし，（α_i=0.1，β_i=0.9）の場合の協調解と競争解での実験結果を比較して示す．

・協調解　　　　　　　　　　・競争解

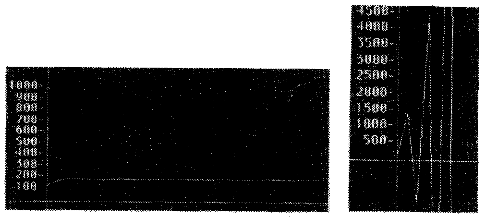

図 10　供給量の総和の変化

すなわち，もともと不安定系であったとしても，エージェントタイプによっては安定した市場をつくることがわかる．

次に，上記のシミュレーション結果において，不安定系でありながら安定した市場を形成した（α_i=0.1，β_i=0.9）のエージェント集団（エージェント数25）に対し，同じ不安定系の（α_i=0.1，β_i=0.4）のタイプのエージェント（エージェント数5）を混入すると次のような結果が得られた．

・協調解　　　　　　　　　　・協調解
（同質エージェント集団）（混質のエージェント集団）

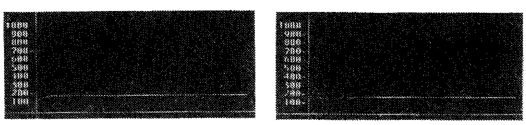

図 11　供給量の総和の変化

このケースでは不安定なタイプのエージェントが混

入することによって，安定して均衡した市場が少し不安定になることがわかる．

これらのシミュレーション結果から，（α_i，β_i）の値の異なるさまざまなタイプのエージェントが混在する場合においては，もともと安定系であった市場が不安定に，また，不安定系であった市場が安定するようになる．すなわち，たとえ安定した市場であったとしても，過剰供給や過小供給を行なうような不安定なタイプのエージェントが多数混入することにより市場は乱れ均衡解に収束しない不安定な市場が形成されることがわかった．逆に，もともと不安定系である市場であっても，その中で動作するエージェントのタイプによっては，均衡解に収束し，そして安定した市場を作り出すことがわかった．

5 結論

本論文では，市場メカニズムの下，個々のエージェントの自律的な行為によって集団にとって最適な均衡解が形成されることを示した．相互に高い依存性が存在しかつその依存性が対称的であった場合，各エージェントは，市場において市場価格と集団の行動量の総和を獲得し，自己の効用関数を最適にすると同時に他のエージェントに与える影響を考慮しながら自己の行為を自律的に抑制する．すなわち，エージェントは，集団を統一体として機能させるための高次の性質と集団を構成する個々の要素の自律性を維持するための二重の性質を有する．そして，エージェントは，自己実現のための自己の目標を最適にする合理的な動作と集団全体の目標実現のために必要な動作を調和させるような行為を自律的に決定し，集団にとって最適な状態を暗黙的に形成することができる．したがって，集団を形成し協調するエージェントとは，他エージェントの存在を認識し，集団全体の高次の目標実現を目指す統一体としての機能と低次の自らの目標を実現するための機能の両方を備えた主体の集合体である．そのようなエージェント集団には，上位（メタ）エージェントや強制力を必要とする社会ルールを必要とはしない．あくまで競争原理に基づき，相互に主体性や価値判断の多元性を相互に認め合いながら相互作用をし，それによって自己の動作を規制する相互主義に基づいた動作原理を特徴とする分権型エージェント社会である．このような考え方に基づき，市場においてマクロ情報を共有しながらエージェント間の自律的な自己規制に基づく相互作用により，集団の秩序が形成されるプロセスを協調計算モデルとして定式化し，シミュレーションによって集団全体の最適解が形成されることを明らかにした．

また，市場価格に対する反応度によって，エージェントのタイプを分類し，市場社会を構成するエージェントのタイプによって，市場はさまざまな様相を呈することをシミュレーションによって明らかにした．また，思いやり係数の学習速度によって，それぞれのエージェントタイプの中においても市場は異なる様相を示すことがわかった．そして，もともと安定した市場系であっても，それに参加するエージェントのタイプによっては不安定な市場が作り出され，逆に不安定な市場系であっても安定した市場が作り出されることを明らかにした．

本論文では，エージェント間の相互依存性性が対称的であるとする仮定を前提として協調計算モデルを定式化した．したがって，相互依存性が対称的でない一般的な場合を想定し，市場におけるマクロ情報から相互の依存性を学習し，あくまで自律的な動作によって協調解を形成することが今後の課題である．

参考文献

[Carley 94] Carley,K.M.,Prietula,M.J: Computational Organization Theory, Lawrence Eralbaum Associares, Publisheres, 1994.

[Kurose 89] Kurose, J., Simha, R.: A Microeconomic Approach to Optimal Resource Allocation in Distributed Computer Systems, IEEE Tran. on Computers, Vol.38, 1989.

[Ordeshook 87] Ordeshook,P.C.,: Game Theory and Political Theory,Cambridge University Press,1987.

[鈴村　82] 鈴村興太郎:　経済計画論，筑摩書房，1982.

[Waldspurger 86] Waldspurger, C,: SPAWN: ADistributed Computational Economy, IEEE Tran. on Software Engineering, Vol.18, 1989.