Vol. 37 No. 12 情報処理学会論文誌 Dec. 1996

分権型意思決定モデル

生天目 章[†] 濱川 孝一郎[†]

本論文では，エージェント間の相互作用を動学的観点から定式化した分権型意思決定モデルを提案する．合目的な行動を自分で決定できる性質のことを自律性と定義されるが，このようなエージェントの自律性は，エージェントの目標に依存する．各エージェントの目標を，自己の認知状態，自己の行動戦略および他エージェントの行動戦略に依存した関数として定式化する．それぞれ自己の目標関数の最適化を目指して合理的な行動をとるエージェント間の行動上の動的な相互作用プロセスを分権型意思決定問題として定式化する．静的および動的な分権型意思決定問題の均衡解として，競争原理の下での均衡解および協調原理の下での協調解をそれぞれ求める．また，動的な問題に対しては，各エージェントが短期目標または長期目標に基づき行動をする場合について各種均衡解をそれぞれ求める．また，協調解と競争解において各エージェントが獲得する各目標関数の値の差によって協調効果を定義し，エージェント数と協調効果の関係やエージェント間の相互作用と協調効果の関係について明らかにする．

Decentralized Decision Making Models

Akira Namatame[†] and Kouichirou Hamakawa[†]

We term such an agent with both a selfish-interest and a social competence as a decentralized agent. The unified model of the mutual interactions among decentralized agents is proposed, and we obtain equilibrium solutions under individually optimal and socially optimal behaviors of decentralized agents. We characterize equilibrium solutions under individually optimal and socially optimal decsions. We formulate the dynamic competitive and cooperative decision problems of independent agents and provide the unified theory of the mutual dynamic interactions among agents. We obtain and analyze asymptotic equilibrium behaviors of autonomous agents. It is shown that the solution of the dynamic problems are obtained as the solution of the associated static problems. The idea of solving the associated static problems without solving the original dynamic problems will provide a great analytical aid in investigating properties of coordinated and asymptotic behaviors of multi-agents in dynamic environments.

1. はじめに

経済学やゲーム理論においては，経済活動の基本要素である組織や個人を主体とみなし，市場を媒体とした財の取引や交換に関わる主体間の相互作用を合理的な意思決定問題として扱う[1),2)]．しかしながら内部モデルを持つ主体間の相互作用に関する研究は，あまり行われていない．エージェント（以下，自律的に活動する主体や個をエージェントと呼ぶ）は，内部モデルを持つ．エージェントの内部モデルは，エージェントの意思決定機構の中に認識される環境や他者に関する情報モデルである．そのような内部モデルには，自分が何であり，他者が何であり，自己と他者の関係が何であるかについて解釈するための枠組みも含まれる[3),4)]．また，そのようなエージェントの内部モデルは，状況の推移に応じて動的に変化をする．したがって，内部モデルを持つエージェント間の相互作用について動学的な観点から扱う必要がある[5),6)]．しかしながら，動学的な観点からのエージェント間の相互作用モデルもまだ十分に確立されていない[7),8)]．

本論文では，内部モデルを持つエージェント間の相互作用を動学的観点から分析するための枠組みとして，分権型エージェントモデルを提案する．合目的な行動を自分で決定できる性質のことを自律性と定義されるが，このようなエージェントの自律性は，エージェントの内部モデルに依存する．そこで各エージェントの内部モデルを，エージェントに共通する情報としての状態変数および自己の行動戦略に依存する目標関数として集約化して定式化する．各エージェントは他の

† 防衛大学校情報工学教室
Department of Computer Science, National Defense Academy

エージェントの行動を考慮に入れながら，自己の目標関数を最適にするための合目的な行動を決定する．それぞれ自己の目標関数の最適化を目指したエージェント間の行動上の動的な相互作用プロセスを分権型意思決定問題として定式化する．分権型意思決定問題とは，他エージェントと共有する状態変数と自己の行動戦略の関数として表される目標関数を最適にするための各エージェントの行動戦略の決定問題である．分権型意思決定問題の均衡解として，競争原理の下での競争解および協調原理の下での協調解をそれぞれ求める．また，動的な問題に対しては，各エージェントが短期目標または長期目標の最適化を目指して行動をする場合の均衡解をそれぞれ求める．また，協調解と競争解において各エージェントが獲得する各目標関数の値の差によって協調効果を定義し，エージェントの数と協調効果の関係やエージェント間の相互作用度と協調効果の関係について明らかにする．

2. 分権型意思決定問題の定式化

本章では，相互依存関係にあるエージェントの相互作用を分析するための枠組みとして分権型意思決定問題を定式化する．個々のエージェントは，自己の目標（効用）関数と競争および協調原理に基づく行動選択ルールとを持つ．自分の行動を自分で決定できる性質のことを自律性と定義されるが，各エージェントの自律性は，自らの目標関数を最適にするための行動を選択するうえでの合理的な行動原理による．しかしながら，各エージェントの目標関数が相互依存関係のある場合には，各エージェントは，自らの目標関数を持ち，そらを最適にする他の活動主体の行動について考慮する必要がある．このような相互依存関係がある状況下においては，他エージェントとの双方向的な相互作用が生じるが，その場合，各エージェントは他エージェントの行動に関する情報を他者知識として内部モデルを形成するようになる．

以上のような相互依存関係のあるエージェント間の相互作用モデルを扱う場合に，各エージェントの意思決定上の分権性の概念が重要になる．各エージェントの目標関数が自己の行動および各エージェントに共通する共有情報だけに依存する場合には，意思決定上の分権性が保持されるといえる．すなわち，行動上の相互依存性は共通の情報の中に埋め込むことにより，各エージェントの目標関数を自己の行動と共有情報だけに依存するモデル化が可能になる．したがって，各エージェントの目標関数は他のエージェントの行動に直接依存しなく，自己の目標を最適にする合理的な行動は，それぞれのエージェントの行動選択によって推移をする共通情報の関数として求めることができる．特に，大規模な意思決定問題においては，個々のエージェントが，すべてのエージェントの行動を直接観察をし，それらをすべて考慮しながら自己の行動を決定することは困難であり，以上のような分権性の性質が重要になる[9]．

分権性の性質を有するエージェントの集合を $S=\{A_i : 1 \le i \le n\}$ で表し，$A_i = \langle X_i, G_i, U_i \rangle$ で個々のエージェント $A_i \in S$ を表す．ここで，X_i はエージェント A_i の状態変数の集合，G_i は目標，および U_i は行動戦略の集合をそれぞれ表す．エージェント A_i の状態変数を連続変数 $x_i(t) \in X_i \subset R$ で表す．また，行動戦略も連続関数として $u_i(t) \in U_i \subset R$ で表す．エージェント A_i の状態変数は状態方程式

$$\begin{aligned} x_i(t) &= f_i\{x_1(t-1), \ldots, x_n(t-1), u_i(t)\} \\ &= f_i\{x(t-1), u_i(t)\} \end{aligned} \tag{2.1}$$

に基づき動的に推移するものとする．ここで，f_i は連続関数を表す．また，エージェント A_i の目標関数を

$$\begin{aligned} &g_i\{x_1(t), \ldots, x_n(t), u_i(t)\} \\ &\quad = g_i\{x(t), u_i(t)\} \end{aligned} \tag{2.2}$$

で定式化する．ここで g_i は連続関数を表す．**図1** に分権性の条件の下でのエージェント間の相互作用の概念図を示す．エージェント間の相互依存関係は，共通情報として共有できる状態変数に集約されている．また，各エージェントの目標関数は，共通情報であるそれぞれのエージェントの状態変数と自己の行動戦略だけに依存する．特に，各エージェントの目標関数が式(2.2)で与えられるように1つの期間に定義される問題を「短期目標の下での動的な分権型意思決定問題」と定義する．

次に，長期目標の下での動的な分権型エージェント

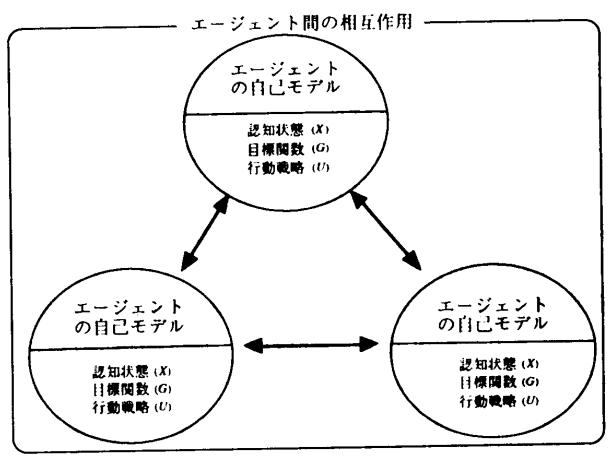


図1 分権型エージェントモデルにおける相互作用の概念図
Fig. 1 The interaction among decentralized agents.

問題を定式化する．式 (2.1) における各エージェントの状態変数に関する状態方程式を1つの方程式としてまとめて記述する．

$$x(t) = f\{x_1(t-1), \ldots, x_n(t-1), u_1(t), \ldots, u_n(t)\} = f\{x(t-1), u(t)\} \quad (2.3)$$

ここで f は，$\{f_1, \ldots, f_n\}$ で構成されるベクトル関数である．また，エージェント A_i が時系列的に選択する行動戦略の集合を，$e_i = \{u_i(t) : t = 0, 1, 2, \ldots\}$ で表す．各エージェントの行動戦略の集合 e_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ の関数として定義される割り引きされた短期目標の累積関数

$$J_i(e_1, e_2, \ldots, e_n) = \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t g_i(x(t), u_i(t)) \quad (2.4)$$

をエージェント A_i の長期的な目標として定義する．ここで α $(0 < \alpha < 1)$ は割引係数を表す．以上の長期的な目標関数を最適にするエージェント A_i の行動戦略の集合 e_i を決定する問題を「長期的な目標に近づく分権型意思決定問題」と定義する[10]．

3. 静的な問題の競争解と協調解

本章では，特に時間的要素を考慮しない静的な分権型意思決定問題の均衡解を求める．すなわち，競争原理の下で各エージェントが行動する場合の均衡解（以下，競争解と呼ぶ）および協調原理の下で協調行動をとる場合の協調解とをそれぞれ求める．ある目標が一貫性を持ってエージェントによって追求されているならば，そのエージェントの意思決定または行動は合理的であるという．したがって自己の目標関数を最適にする行動を，特に「エージェントの個人的合理性を満足する行動」と定義する．そのような行動は次式で与えられる．

$$\phi_i(x(i)) = \arg \underset{x_i}{Max}\, g_i(x(i), x_i) \quad (3.1)$$

ここで，x_i はエージェント A_i の行動戦略および $x(i) \triangleq (x_1, \ldots, x_{i-1}, x_{i+1}, \ldots, x_n)$ は，エージェント A_i 以外の他のエージェントの行動戦略を表す．$\phi_i(x(i))$ を，エージェント A_i の反応関数と定義する．反応関数 $\phi_i(x(i))$ は，エージェント A_i の目標関数を最適にするための行動，すなわち，他のエージェントの行動戦略 x_i の下でのエージェント A_i の個人的合理性を満足する行動を表す．すなわち，反応関数 $\phi_i(x(i))$ は，他のエージェントの行動 x_i を所与としたときに，エージェント A_i が選択できる最適な行動を規定している．エージェントの目標関数が他のエージェントの行動に依存する，すなわち，各エージェントの行動に相互依存性がある場合には，自分の意思決定によって他のエージェントがどのように反応するかという予測の下で行われなければならない．したがって，社会を構成するすべてのエージェントの個人的合理性の条件を満足する解を競争解として定義する．そのような競争解は，各エージェントの反応関数の不動点として定義される．エージェント A_i の反応関数 $\phi_i(x(i))$ は，定義域として $X(i)$，値域として X_i を持つ．ここで，$X(i) \triangleq X_1 \times \cdots \times X_{i-1} \times X_{i+1} \times \cdots \times X_n$ また，各エージェントの反応関数を1つのベクトル関数としてまとめて

$$\phi(x) = (\phi_1(x(1)), \phi_2(x(2)), \ldots, \phi_n(x(n)) \quad (3.2)$$

で定義する．ここで，$\phi(x)$ の定義域および値域ともに $X \triangleq X_1 \times \cdots \times X_i \times \cdots \times X_n$ となる．競争解は，式 (3.2) で定義されるベクトル反応関数の $\phi(x)$ 不動点，すなわち

$$x^0 = \phi(x^0) \quad (3.3)$$

として定義される．以上の競争解はナッシュ解とも定義される[11]．競争解においては，もし他のエージェントがその均衡点によって定義される行動 $x^0(i) = (x_1^0, \ldots, x_{i-1}^0, x_{i+1}^0, \ldots, x_n^0)$ を選択するのであれば，エージェント A_i の最適行動（すなわち個人的合理性の条件を満たす行動）も，やはりその均衡点 x_i^0 によって与えられるという性質を有している．したがって競争解とは，すべてのエージェントが自分以外のエージェントの行動に対する最適な反応を同時に選択するときに生じる，一種の安定した均衡状態のことである．すなわち，そのような均衡点においては，すべてのエージェントが他のエージェントの意思決定を所与として最善を尽くしていることを意味する．

次に静的な問題の競争解を具体的に求める．エージェント A_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ が選択する行動戦略 $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n) \in x^n$ に対し次式の価値関数を定義する．

$$p_i(x_1, \ldots, x_n) = a_i - \sum_{i=1}^{n} b_{ij} x_i \quad (3.4)$$

以上の価値関数を用いて，各エージェントの目標関数を次の2次関数で定義する．

$$g_i(x(i), x_i) = x_i p_i(x_1, \ldots, x_n) - k_i x_i^2/2 = x_i(a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j) - k_i x_i^2/2 \quad (3.5)$$

ここで，$x_i p_i(x_1, \ldots, x_n)$ は自己の行動戦略が x_i およ

び他エージェントの行動戦略が $x(i)=(x_1,\cdots,x_{i-1},x_{i+1},\ldots,x_n)$ の場合にエージェント A_i が受け取る総価値および $k_i x_i^2/2$ は行動戦略 x_i にともなうコスト関数を表す．以上のエージェント A_i の目標関数を最適にする解は，

$$\partial g_i/\partial x_i = a_i - \sum_{j\neq 1}^{n} b_{ij}x_j - b_{ii}x_i - k_i x_i = 0, \quad i=1,2,\ldots,n \tag{3.6}$$

を満足する解として与えられる．またエージェント A_i の反応関数は

$$\phi_i(x(i)) = (a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j)/(2b_{ii}+k_i), \quad i=1,2,\ldots,n \tag{3.7}$$

で与えられる．したがって，式(3.3)より競争解は，次式の行列方程式の解として求められる．

$$(B+B_1+K)x = a \tag{3.8}$$

ここで B は，式(3.5)の b_{ij}, $i,j=1,2,\ldots,n$ を要素とする $n\times n$ 行列，B_1 は b_{ii}, $i=1,2,\ldots,n$ を要素とする対角行列，K は k_i, $i=1,2,\ldots,n$ を要素とする対角行列，a は a_i, $i=1,2,\ldots,n$ を要素とする列ベクトルを表す．

次に協調解を求める．競争解は，それぞれのエージェントが自己の目標関数を最適にする個人的合理性に基づく行動の均衡解として定義された．一方，協調解は，社会を構成する各エージェントの目標関数の総和として定義される共通の目標関数

$$\begin{aligned} S(x_1,\ldots,x_n) &= \sum_{i=1}^{n} g_i(x(i),x_i) \\ &= \sum_{i=1}^{n}\left[x_i\left(a_i-\sum_{j=1}^{n}b_{ij}x_j\right)k_i x_i^2/2\right] \end{aligned} \tag{3.9}$$

を最適にする解として定義する．以上の協調解は，他のエージェントの目標関数を犠牲にすることなく，あるエージェントの目標関数を改善することができないような解として解釈することもできる．そのような協調解は

$$\partial S/\partial x_i = a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j - k_i x_i = 0, \quad i=1,2,\ldots,n \tag{3.10}$$

を同時に満足する解として与えられる．したがって，協調解は，次式の行列方程式の解として与えられる．

$$(B+B^T+K)x = a \tag{3.11}$$

ここで，B^T は B の転置行列である．

4. 分権型意思決定問題の例

本章では，分権型意思決定問題の例としてエージェントの世代間の資産等の継承問題を定式化する．各エージェントはそれぞれの親から資産を継承し，継承した資産上の制約の下で自己の目標を実現するための合理的な行動をとる．すなわち，各主体は前世代から継承した資産を所与の条件として自己の効用関数を最適にするような行動を選択をする．エージェントが親から継承する資産のレベルをエージェントの状態変数によって表す．世代 t における社会を構成するエージェントの状態変数の集合を

$$x(t) = (x_1(t),\ldots,x_i(t),\ldots,x_n(t)) \tag{4.1}$$

で表す．また，世代 t におけるエージェントの資産形成への投資レベルを行動戦略を

$$u(t) = (u_1(t),\ldots,u_i(t),\ldots,u_n(t)) \tag{4.2}$$

で表す．エージェントが世代にわたって継承をする資産を表す状態変数は，世代が替わるごとに動的に推移をする．また，各主体が継承をした資産（状態変数）は，他の主体が継承をした資産と相互作用があり，次の世代に継承される資産レベルは，エージェントの資産形成への投資レベルと各エージェントの資産の間の相互作用関係によって決定されるものとする．したがって，各世代にわたって継承される資産の動的な推移モデルを，各エージェントの行動戦略と前世代から継承をした資産レベルの関数として次式で定式化する．

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j(t-1) + u_i(t) \tag{4.3}$$

例として，相互作用係数は自己の成分は $a_{ii}=(1-\delta_i)$ で，それ以外はゼロとする．この場合，δ_i は世代間に継承される資産の各世代における減衰率を表している．各世代において主体が同じレベルの行動戦略，$u_i(\tau)=u$, $\tau=1,2,\ldots,t$ を選択した場合，世代 t において蓄積される資産（内部状態）レベルは，

$$x_i(t) = \sum_{\tau=1}^{t}(1-\delta_i)^{\tau}u \tag{4.4}$$

で求められ，過去の行動戦略の（割り引きされた）蓄積を表す．したがって動的な意思決定問題とは，資産や名声レベルの蓄積といった問題のように，現在の状況が過去に選択した行動戦略によっても影響されるような問題を扱うものである．また，相互作用係数 a_{ij} はエージェント A_j の資産がエージェント A_i の資産形成に及ぼす影響度を表す．特に，$a_{ij}>0$ の場合は，エー

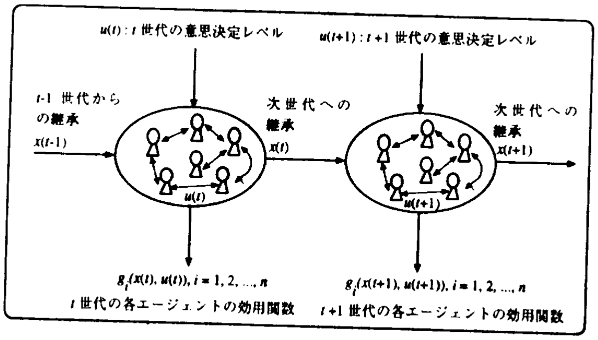


図2 分権型意思決定問題の例

Fig. 2 An example of a decentralized decision-making problem.

ジェント A_j とエージェント A_i の資産は資産形成において相互補完の関係にあり，逆に $a_{ij} < 0$ の場合には相互抑制の関係にあるといえる．各主体間の資産形成上の相互作用係数を表す係数 $a_{ij},\ i,j = 1,2,\ldots,n$ を要素とする行列 A を各主体の状態変数間の状態の相互作用行列と呼ぶ．エージェント間の状態変数の動態的な推移関係を次式で与えらる．

$$x(t) = Ax(t-1) + u(t) \tag{4.5}$$

ここで，A は $n \times n$ 行列，$x(t)$，$u(t)$ は $n \times 1$ 行列である．

以上の動的な分権型意思決定問題の枠組みについて**図2**に示す．動的な問題においては各主体間には，相互作用行列 A によって表される状態変数間の相互作用と，相互作用行列 B によって表される各主体の目標関数間での相互作用とがある．以上の動的な問題は，前世代からの資産レベルをベースにして各エージェントが，自分の世代だけの短期目標（自分の世代に受け取る効用）を最適にする問題が短期目標下での分権型意思決定問題である．一方，世代間にまたがった長期的な目標を最適にする問題，すなわち各エージェントは，自己の世代だけでなく長期世代にわたる子孫全体が受け取る効用を最適にする問題が，長期目標下での分権型意思決定問題である．2章で定義した各エージェントの長期目標には，次のような関係式がある．

$$J_i(t) = g_i(x(t), u(i,t), u_i(t)) + \alpha J_i(t+1) \tag{4.6}$$

すなわち，世代 t 以降の子孫全体の受け取る割り引きされた効用の総和は，自己の世代に受け取る効用と世代 $t+1$ 以降の子孫全体の受け取る効用の総和を割り引いた効用に等しい．ここで，α は，将来受け取る目標値を現在価値として割り引くための割引係数である．$1-\alpha$ が各世代ごとに割り引かれる比率を表し，したがって α の値がゼロに近いと将来受け取る目標に対する価値が低く，それが1に近いほど現在受け取る効用と将来受け取る効用との間に差があまりないことを表す．

5. 動的問題の競争解と協調解

本章では短期目標および長期目標の下での動的問題の競争解と協調解を求める．各エージェントが共有する状態変数に関する式 (2.1) の状態方程式を式 (4.5) と同じようにの線形方程式として定式化する．

$$x(t) = Ax(t-1) + u(t) \tag{5.1}$$

また式 (2.5) の各エージェントの目標関数を次式の2次関数として定式化する．

$$\begin{aligned} &g_i(x(t), u(t)) \\ &\quad = x_i(t)\left\{a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j(t)\right\} - k_i u_i^2(t)/2 \end{aligned} \tag{5.2}$$

以上のエージェント A_i の目標関数を最適にする，すなわち個人的合理性を満たす行動戦略は，次の方程式の解として与えられる．

$$\begin{aligned} &\partial g_i/\partial u_i(t) \\ &\quad = a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j(t) - b_{ii}x_i(t) - k_i u_i(t) \\ &\quad = a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}\left[\sum_{k=1}^{n} a_{jk}x_k(t-1) + u_j(t)\right] \\ &\qquad - 2b_{ii}\left(\sum_{k=1}^{n} a_{ik}x_k(t-1) + u_i(t)\right) \\ &\qquad - k_i u_i(t) \\ &\quad = 0 \end{aligned} \tag{5.3}$$

ここで，エージェント A_i の反応関数を

$$\phi_i(x(t-1), u(i,t)) = \arg \underset{u_i(t)}{Max}\, g_i(x(t), u_i(t))$$

と定義し，式 (4.3) を解くと，

$$\begin{aligned} &(2b_{ii} + k_i)\phi_i(x(t-1), u(i,t)) \\ &\quad = a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} \sum_{k=1}^{n} a_{jk}x_k(t-1) \\ &\qquad - b_{ii}\sum_{k=1}^{n} a_{ik}x_k(t-1) - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}u_j(t) \end{aligned} \tag{5.4}$$

を得る．ここで，$u(i,t)$ はエージェント A_i 以外の他のエージェントの時間 t における行動戦略，すなわち $u(i,t) = (u_1(t),\ldots,u_{i-1}(t),u_{i+1}(t),\ldots,u_n(t))$ を表す．また，

$$\bar{a}_i \triangleq a_i/(2b_{ii}+k_i), \bar{b}_{ij} \triangleq b_{ij}/(2b_{ii}+k_i) \tag{5.5}$$

とおくことにより，式 (5.5) は式 (5.6) として表すことができる．

$$\begin{aligned}\phi_i(x(t-1), u(i,t)) &= \bar{a}_i - \sum_{j=1}^{n} \bar{b}_{ij} \sum_{k=1}^{n} a_{jk} x_k(t-1) \\ &\quad - \bar{b}_{ii} \sum_{k=1}^{n} a_{ik} x_k(t-1) - \sum_{j\neq i}^{n} \bar{b}_{ij} u_j(t)\end{aligned} \tag{5.6}$$

したがって，動的問題の短期目標の下での競争解は，各エージェントの反応関数の不動点として次式を満足する解として与えられる．

$$\phi(x(t-1), u^0(t)) = u^0(t) \tag{5.7}$$

すなわち，

$$(B+B_1+K)u^0(t) = a-(B+B_1)Ax(t-1) \tag{5.8}$$

動的問題の短期目標の下での競争解は，各エージェントの共有情報である時点 $t-1$ における状態変数の関数として表され，他のエージェントのとる行動戦略には依存しなく，意思決定上の分権性を有している．次に動的な問題の短期目標の下での協調解を求める．社会を構成する各エージェントの目標関数の総和として定義される関数

$$S = \sum_{i=1}^{n} g_i\{x(t), u_i(t)\} \tag{5.9}$$

を最適にする協調解は，

$$\begin{aligned}\partial S/\partial u_i(t) &= a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j(t) - \sum_{j=1}^{n} b_{ji}x_j(t) - k_i u_i(t) \\ &= a_i - \sum_{j=1}^{n}(b_{ij}+b_{ji})x_j(t) - k_i u_i(t) \\ &= a_i - \sum_{j=1}^{n}(b_{ij}+b_{ji})\left[\sum_{k=1}^{n} a_{jk}x_k(t-1) + u_j(t)\right] - k_i u_i(t) \\ &= 0, \qquad i=1,2,\ldots,n\end{aligned} \tag{5.10}$$

を同時に満足する解として与えられる．

次にもし各世代におけるエージェントの競争的行動戦略が世代によって変化しないある一定値に収束する場合，すなわち，$u_i^0(t) \to u_i^0$ となる場合，$u^0 = (u_1^0, \ldots, u_i^0, \ldots, u_n^0)$ を「短期目標の下での動的問題の定常競争解」と定義する．そのような定常解は，次式の行列方程式の解として与えられる

$$\begin{aligned}(B+B_1+K)u &= a-(B+B_1)Ax \\ x &= Ax+u\end{aligned} \tag{5.11}$$

したがって，定常状態における短期目標下での動的な競争解は次の行列方程式の解として与えられる．

$$(B+B_1+K(I-A))x = a \tag{5.12}$$

以上の式において，$A \equiv 0$，すなわち状態変数が動的に推移しない場合には，

$$(B+B_1+K)x = a \tag{5.13}$$

となり，式 (3.8) で求めた静的な問題の競争解と同じになる．同様に，定常状態における短期目標下での動的な協調解は，次の行列方程式の解として与えられる．

$$(B+B^T+K(I-A))x = a \tag{5.14}$$

次に，長期目標の下での動的問題の定常状態における競争解と協調解を求める．各エージェントは，割り引かれた短期目標関数の累積関数として定義される自己の長期的な目標を最適にする各時点の行動として定義される時系列の行動戦略 $e_i = \{u_i(t) : t=0,1,2,\ldots\}$ を選択する．もしエージェント A_i の行動戦略 e_i^0 を構成する個々の行動 $u_i^0(t)$, $t=0,1,2,\ldots$ が時間に依存しない，ある一定値に収束する場合，すなわち，$u_i^0(t) \to u_i^0$ となる場合，$u^0 = (u_1^0, \ldots, u_i^0, \ldots, u_n^0)$ を「長期目標の下での動的問題の定常競争解」と定義する．長期目標の下での定常競争解は，次式の静的問題を $i=1,2,\ldots,n$ について同時に解くことにより求めることができる[12]．

$$\begin{aligned}&\underset{u_i}{Max}\, g_i(x, u_1, u_2, \ldots, u_n) \\ &s.t.\ \ x - f(x, u_1, u_2, \ldots, u_n) = (1-1/\alpha)(x-x^0)\end{aligned} \tag{5.15}$$

ここで，x^0 は状態変数 x_i の定常状態における値で，$x^0 = f(x^0, u_1^0, u_2^0, \ldots, u_n^0)$ の条件式を満たすベクトルである．特に，目標関数が 2 次関数として

$$\begin{aligned}g_i\{x_1(t), \ldots, x_n(t), u_i(t)\} \\ = x_i(t)\{a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j(t)\} - k_i\{u_i(t)\}^2/2\end{aligned} \tag{5.16}$$

で与えられる場合，定常状態における競争解は，以下の静的な問題を同時に解くことにより求めることができる．

$$\begin{aligned}&\underset{u_i}{Max}\, g_i(x, u(i), u_i) \\ &s.t.\ \ x - Ax - u = (1-1/\alpha)(x-x^0)\end{aligned} \tag{5.17}$$

式 (5.5) の最適化問題は，制約条件式の中に求めるべき解の一部が含まれる．そのような問題は，以下の手順で解くことができる．すなわち，制約条件式に含まれる解をあるパラメータ s に置き換え，s に関し最適解を求める．そのような解を s をパラメータとして $x(s)$ として表す．パラメータ s に関して求められた最適解の s に関する不動点，すなわち

$$x(s^0) = s^0 \tag{5.18}$$

を求めることにより式 (5.3) を解くことができる．式 (5.3) の制約条件式の x_i^0 を s_i で置き換えると

$$x_i - \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j - u_i = (1-1/\alpha)(x_i - s_i),\quad i = 1,2,\ldots,n \tag{5.19}$$

を得る．式 (5.7) を u_i について整理すると次式を得る．

$$\begin{aligned} u_i &= x_i - \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j - \beta(x_i - s_i) \\ &= (1-\beta-a_{ii})x_i - \sum_{j\neq i}^{n} a_{ij}x_j + \beta s_i \\ &\qquad 1 - 1/\alpha \triangleq \beta \end{aligned} \tag{5.20}$$

式 (5.20) を用いることにより，式 (5.16) の u_i に関する最適化問題を x_i に関する最適化問題に変形する．すなわち式 (5.16) の目標関数は x_i の関数として次のように表すことができる．

$$\begin{aligned} g_i(x_i, u(i), u_i) &= x_i\left(a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j\right) \\ &\quad - k_i\left\{(1-\beta-a_{ii})x_i - \sum_{j\neq i}^{n} a_{ij}x_j + \beta s_i\right\}^2 \Big/ 2 \end{aligned} \tag{5.21}$$

以上の目標関数を x_i に関して最適にする解は，次式の解として与えられる．

$$\begin{aligned} &\partial g_i/\partial x_i \\ &= a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j - 2b_{ii}x_i - k_i(1-\beta-a_{ii}) \\ &\quad \left\{(1-\beta-a_{ii})x_i - \sum_{j\neq i}^{n} a_{ij}x_j + \beta s_i\right\} \\ &= 0 \end{aligned} \tag{5.22}$$

式 (5.22) を解くことにより，次式を得る．

$$\sum_{j=1}^{n} \hat{b}_{ij}x_j + k_i(1-\beta_i-a_{ii})\left\{\sum_{j=1}^{n} \hat{a}_{ij}x_j + \beta s_i\right\} = a_i \tag{5.23}$$

ここで

$$\hat{b}_{ij} = \begin{cases} 2b_{ii} & i = j \\ b_{ij} & i \neq j \end{cases}$$

$$\hat{a}_{ij} = \begin{cases} (1-\beta-a_{ii}) & i = j \\ -a_{ij} & i \neq j \end{cases}$$

を表す．

式 (5.23) より以下の式を得る．

$$(B + B_1)x(s) + H(\hat{A}x(s) + \beta s) = a \tag{5.24}$$

ここで $H = (h_i)$ は，

$$\begin{aligned} h_i &= k_i(1-\beta-a_{ii}) \\ &= k_i(1/\alpha - a_{ii}) \end{aligned} \tag{5.25}$$

を対角要素とする対角行列である．式 (5.18) の関係が成立する不動点は式 (5.24) を用いることにより次式で与えられる．

$$(B + B_1)x(s^0) + H(\hat{A}x(s^0) + \beta s^0) = a \tag{5.26}$$

すなわち，

$$(B + B_1 + H(\hat{A} + \beta I))x^0 = a \tag{5.27}$$

を満たす解として求められる．ここで，

$$\hat{A} + \beta I = \begin{pmatrix} 1-a_{11} & -a_{12} & \cdots & -a_{1n} \\ -a_{21} & 1-a_{22} & & -a_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \cdots & 1-a_{nn} \end{pmatrix} = I - A \tag{5.28}$$

となる．したがって，長期目標の下での定常状態における競争解は，次の行列方程式の解で与えられる．

$$(B + B_1 + H(I - A))x = a \tag{5.29}$$

または，

$$(B + B_1 + D)x = a \tag{5.30}$$

式 (3.8) の静的問題の競争解に関する条件式と比較すると $D \triangleq H(I - A)$ は，競争解の動的要素を表している．たとえば，状態変数間の相互作用を表す行列 A が対角行列として

$$A = \begin{pmatrix} 1-\delta_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1-\delta_n \end{pmatrix}$$

で表されるとき，行列 H は次式で与えられる．

$$H = \begin{pmatrix} k_1(1/\alpha-(1-\delta_1)) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_n(1/\alpha-(1-\delta_n)) \end{pmatrix} \tag{5.31}$$

したがって式 (5.30) の動的要素を表す対角行列 D の各対角要素は次式で与えられる．

$$d_i = k_i\delta_i\{1/\alpha_i - (1-\delta_i)\}, \quad i = 1, 2, \ldots, n \tag{5.32}$$

すなわち，式 (3.8) の静的な目標関数のコスト係数 k_i を動的要素 δ_i（認知状態の減衰率）と α（目標の割引率）で修正された係数が，動的問題の競争解を特徴づける動的要素になっている．

一方，長期目標下での動的問題の定常状態における協調解は，以下の問題を解くことにより求めることができる．

$$\begin{aligned} &Max \sum_{i=1}^{n} g_i(x, u(i), u_i) \\ &s.t.\ x - Ax - u = (1-1/\alpha)(x - x^*) \end{aligned} \tag{5.33}$$

同様にして，長期目標の下での定常状態における協調解は，次式の行列方程式の解として与えられる．

$$(B + B^T + H(I - A))x = a \tag{5.34}$$

6. 各種均衡解の性質

6.1 協調効果と社会的ジレンマ

各エージェントの目標関数上の相互作用行列 B が対称行列の場合，エージェント社会の競争解と協調解とを具体的に求め，それらの諸性質について明らかにする．特に，式 (3.5) のコスト関数の係数 $k_i = 0$, $i = 1, 2, \ldots, n$ の場合の競争は，

$$\begin{aligned} \partial g_i\{x_i, x(i)\}/\partial x_i &= a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j - 2b_{ii}x_i \\ &= 0, \quad i = 1, 2, \ldots, n \end{aligned} \tag{6.1}$$

を同時に満足する解として与えられる．これを解くと

$$x_i^0 = \left(a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j\right) \Big/ 2b_{ii} \tag{6.2}$$

を得る．また，競争解における各エージェント A_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ の価値関数は，

$$\begin{aligned} p_i(x_1^0, \ldots, x_i^0, \ldots, x_n^0) &= a_i - b_{ii}x_i^0 - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j^0 \\ &= \{a_i - (a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j^0)/2\} - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j^0 \\ &= (a_i - \sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j^0)/2 \\ &= b_{ii}x_i^0 \end{aligned} \tag{6.3}$$

で与えられる．したがって，競争解における各エージェントの目標関数の値は，次式で与えられる．

$$\begin{aligned} g_i(x_1^0, \ldots, x_i^0, \ldots, x_n^0) &= p_i(x_1^0, \ldots, x_i^0, \ldots, x_n^0)x_i^0 \\ &= b_{ii}(x_i^0)^2 \end{aligned} \tag{6.4}$$

一方，協調解は，

$$\begin{aligned} \partial S/\partial x_i &= \partial g_i/\partial x_i + \sum_{j\neq i}^{n} \partial g_i/\partial x_i \\ &= a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j - \sum_{j=1}^{n} b_{ji}x_j \\ &= 0, \quad i = 1, 2, \ldots, n \end{aligned} \tag{6.5}$$

を同時に満足する解として与えられる．すなわち

$$\sum_{j=1}^{n}(b_{ij} + b_{ji})x_j^* = a_i \tag{6.6}$$

として与えられる．また，協調解 $x^* = (x_1^*, \ldots, x_i^*, \ldots, x_n^*)$ におけるエージェント A_i の価値関数は，

$$\begin{aligned} p_i(x_1^*, \ldots, x_i^*, \ldots, x_n^*) &= a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j^* \\ &= \sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j^* \end{aligned} \tag{6.7}$$

で与えられる．したがって，協調解における各エージェントの目標関数の値は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} g_i(x_1^*, \ldots, x_i^*, \ldots, x_n^*) &= p_i(x_1^*, \ldots, x_i^*, \ldots, x_n^*)x_i^* \\ &= b_{ii}(x_i^*)^2 + \sum_{j\neq i}^{n} b_{ji}x_j^*x_i^* \end{aligned} \tag{6.8}$$

したがって，エージェント社会全体で獲得する目標関数の値の総和は，それぞれ次式で与えられる．

$$G^0(n) = \sum_{i=1}^{n} b_{ii}(x_i^0)^2 \tag{6.9}$$

$$G^*(n) = \sum_{i=1}^{n} b_{ii}(x_i^*) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n} b_{ij}x_j^*x_i^* \tag{6.10}$$

まず最初に，相互作用行列 B の対角要素が同じ係数

d，および非対角要素が同じ係数 b $(0 < b \leq d)$ とする．特に，$b \ll d$ の場合は目標関数上の相互依存性の低い，また $b \cong d$ の場合は相互依存性の高いエージェント社会となる．また各エージェントの目標関数の他の係数も同じ $k_i = k$, $a_i = a$, $i = 1, 2, \ldots, n$ とする．以上の仮定の下，式 (6.1)，(6.2) を $k \equiv 0$ として解くことにより，競争解および協調解における各エージェントの目標関数の値は，それぞれ次式で与えられる．

$$g_i^0(n) = a^2 d/(2d + b(n-1))^2 \quad (6.11)$$

$$g_i^*(n) = a^2/4(d + b(n-1)) \quad (6.12)$$

したがって，均衡解における各エージェントの目標値の総和は，次式で与えられる．

$$G^0(n) = \sum_{i=1}^{n} g_i^0(n) = a^2 dn/(2d + b(n-1))^2 \quad (6.13)$$

$$G^*(n) = \sum_{i=1}^{n} g_i^*(n) = a^2 n/4(d + b(n-1)) \quad (6.14)$$

また，エージェントの数 n を無限大にすることにより

$$\lim_{n\to\infty} G^*(n) = a^2/4b \quad (6.15)$$

を得る．しかしながら，競争解においては次式を得る．

$$\lim_{n\to\infty} G^0(n) = 0 \quad (6.16)$$

図 3 に n の変化にともなう $G^0(n)$ および $G^*(n)$ を示すが，両者の差，すなわち

$$E(n) \doteq G^*(n) - G^0(n) \quad (6.17)$$

が協調効果を表す．特に，図 3 (a) は目標関数上の相互依存性が低い場合，図 3 (b) は相互依存性が高い場合の協調効果を表している．すなわち，相互依存性が高い場合は，エージェント数が少ない状態においてもいわゆる社会的ジレンマの現象が生じ，競争解より協調解の方がエージェント全体が獲得する目標の総和は大きく，その現象はエージェント数の増大とともに顕著である．一方，目標関数の相互依存性が低い場合は，競争解および協調解いずれにおいてもエージェント数の増大にともない社会全体で獲得することができる目標関数の値は増大する．これは，エージェント数が少ない場合は，エージェント間の相互作用による影響度が小さいためである．しかしながら，エージェント数の増大にともない競争解において，エージェント全体が獲得する目標値の総和は急速に悪化する．競争解におけるエージェント全体の目標関数の総和である $G^0(n)$ をエージェントの数 n で微分をすると

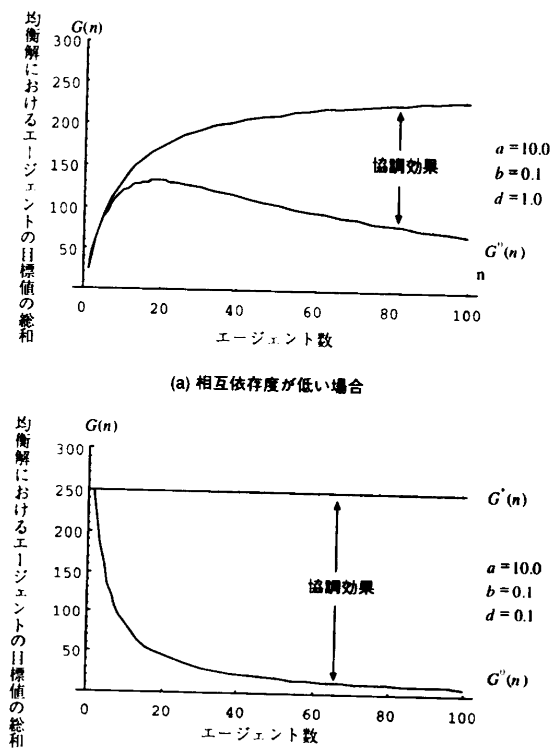


図 3 均衡解における社会におけるエージェントの目標値の総和
Fig. 3 The sum of the values of object functions of the agents at equilibria.

$$\partial G^0(n)/\partial n = a^2 d\{2d - (n+1)b\}/\{2d + b(n-1)\}^3 \quad (6.18)$$

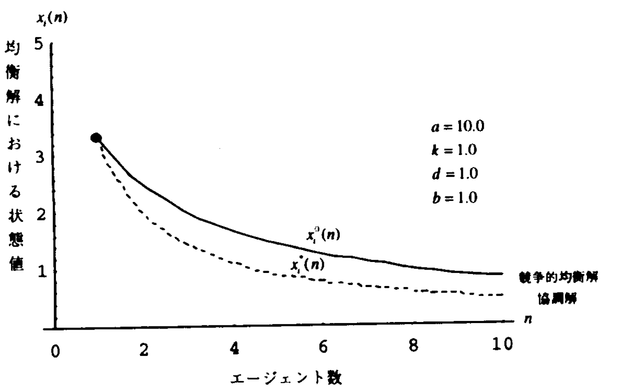
を得る．したがって，$G^0(n)$ は，$n^0 = 2(d/b) - 1$ までは増加関数でそれ以降減少関数になる．エージェント数が小さい場合は，エージェント間の相互作用度は小さく，目標達成上競争行動と協力行動との相違は小さいが，エージェントの数が多くなると相互作用の度合いが大きくなり，協力行動との相違が顕著になる．したがって，エージェント数が増加するにつれ競争行動から協力行動に転移する誘因が強く働くようになるといえる．また，行動上の分岐点となるのは $G^0(n)$ が増加関数から減少関数に転じる点，すなわちエージェント数が

$$n^0 = 2(d/b) - 1 \quad (6.19)$$

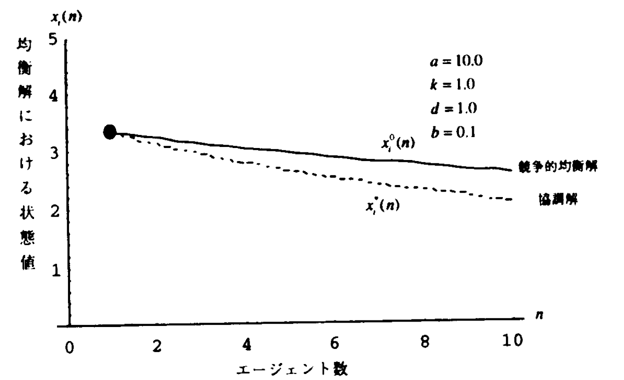
の場合と考えられる．

6.2 各種均衡解の比較

次に，短期目標および長期目標の下で各エージェントが合理的な行動をとる場合の競争解と協調解とを具体的に求め，それらの行動上の諸性質について比較する．相互作用行列 B の対角要素が同じ係数 d，および非対角要素が同じ係数 b $(0 < b \leq d)$ として，また



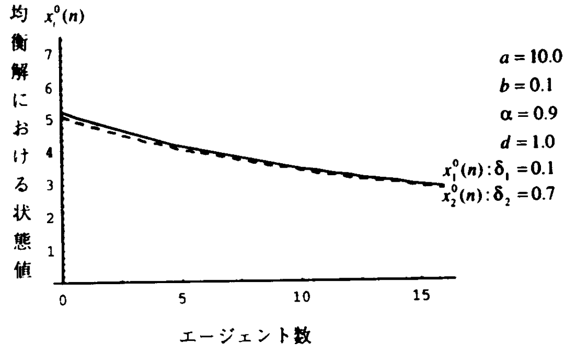
(a)：エージェント間の相互依存性が高い場合



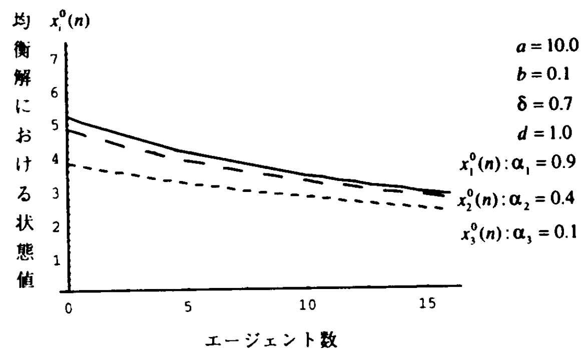
(b)：エージェント間の相互依存性が低い場合

図 4　静的な問題の均衡解における状態値

Fig. 4　Equilibrium solutions of static problem. (a) high-level independence, (b) low level independence.



(a)：減衰率 δ_i が均衡解に及ぼす影響



(b)：割引率 α_i が及ぼす影響

図 5　動的な問題の均衡解における状態値

Fig. 5　State values at equilibria of a dynamic problem.

対角行列 K および列ベクトル a もそれぞれ同じ要素，すなわち，$k_i = k$, $a_i = a$, $i = 1, 2, \ldots, n$ とする．これらの条件の下で式 (3.8)，(3.11)，(5.13)，(5.14) および (5.29)，(5.34) を解くことにより，競争解および協調解は，社会におけるエージェントの数 n および動的要素を表す d_λ をパラメータとして，

$$x_i^0(n) = a/(2d + b(n-1) + k_\lambda)$$
$$x_i^*(n) = a/(2d + 2b(n-1) + k_\lambda) \qquad (6.20)$$

で求められる．ここで，動的要素を表すパラメータ d_λ は，以下の式で与えらる．

(1)　静的な問題

$$k_\lambda \equiv k_s = k \qquad (6.21)$$

(2)　短期目標の下での動的な問題

$$k_\lambda \equiv k_{DS} = \delta k \qquad (6.22)$$

(3)　長期目標の下での動的な問題

$$k_\lambda \equiv k_{DL} = k\delta(1/\alpha - (1-\delta)) \qquad (6.23)$$

静的な問題の競争解および協調解とエージェント数との関係を図 4 に示す．エージェントの数が多くなるにつれ協力解および競争解は低くなることが分かる．また，競争解は協調解よりも高く，その比は，相互依存度が低い場合には，

$$\lim_{n\to\infty} \{x_i^0(n)/x_i^*(n)\} \approx 2 \qquad (6.24)$$

を得る．しかし，相互依存度が低い場合には競争解と協調解の差は小さい．動的問題における減衰率 (δ) は，獲得または蓄積した社会における各エージェントの活動（名声）レベルが一定の期間において減衰する割合を表す．一方，割引率 (α) はエージェントが長期的に獲得する効用に連動するもので，将来獲得するであろう効用の現時点での価値を表す．長期目標の下での動的な問題の競争解を図 5 に示すが，減衰率は均衡解にほとんど影響を与えないが，割引率は大きな影響を及ぼす．次に静的な問題および短期目標および長期目標の下での動的な問題の競争解の比較を行う．

(1)　静的な問題と短期目標の下での動的問題

$$k_s > k_{DS} \qquad (k > k\delta) \qquad (6.25)$$

よって短期目標の下での動的な問題の方が静的な問題と比較して，より高いレベルで均衡する．

(2)　静的な問題と長期期目標の下での動的な問題

$$k_s > k_{DL}$$

すなわち，

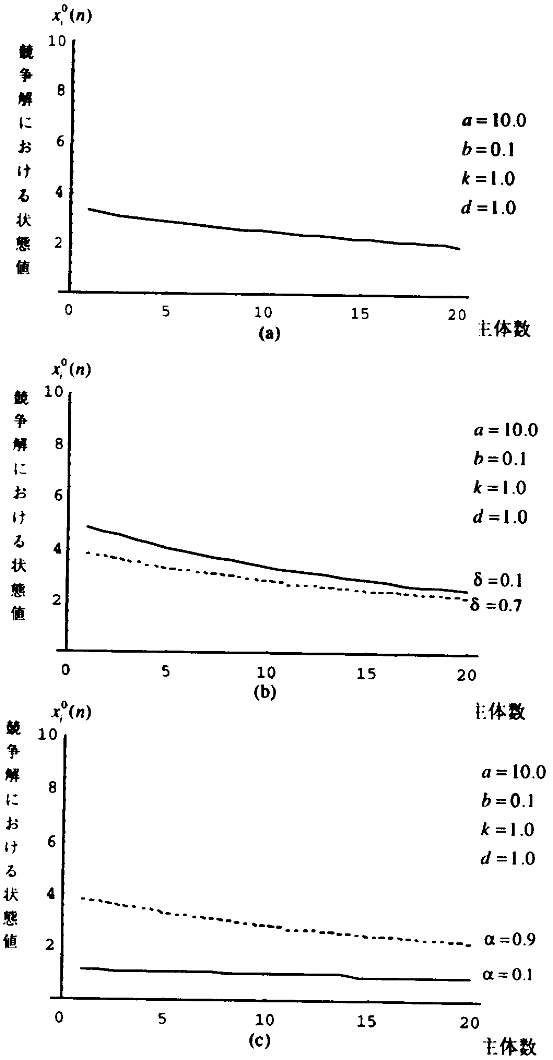


図6 エージェント数と競争解との関係

Fig. 6 Competitive equilibria as the function of the size of agents. (a) Static problem, (b) Dynamic problem with short-term object, (c) Dynamic problem with long-term object.

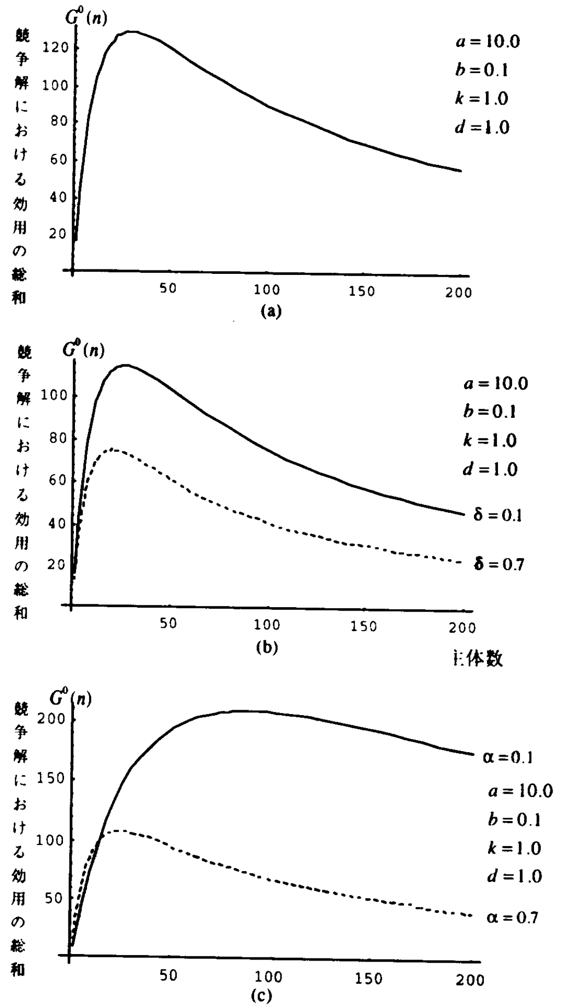


図7 エージェント数と競争解における効用との関係

Fig. 7 The sum of utilities at the competitive equilibria as the function of the size of agents. (a) Static problem, (b) Dynamic problem with short-term object, (c) Dynamic problem with long-term object.

$$\alpha > 1/\{(1-\delta)+1/\delta\} \tag{6.26}$$

ならば長期目標の下での動的な問題の方が静的な問題と比較して高いレベルで均衡する．

(3) 短期目標および長期目標の下での動的な問題

$$K_{DS} > k_{DL}$$

すなわち，

$$\alpha > 1/(2-\delta) \tag{6.27}$$

ならば，長期目標の下での問題の方が，短期目標の下での問題より高いレベルで均衡する．次に，静的な問題と動的な問題の競争解において各エージェントが獲得する効用の比較をする．動的要素を表す k_λ をパラメータとして競争解における社会的価値関数の値を求めると，以下の式で与えられる

$$p_i(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0) = (d+k_\lambda)x_i^0 \tag{6.28}$$

したがって，競争解において各エージェントが各世代または一期間において獲得する効用は

$$\begin{aligned} g_i&(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0)\\ &= p_i(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0)x_i^0 - k(x_i^0)^2/2\\ &= (d+k_\lambda-k/2)(x_i^0)^2 \end{aligned} \tag{6.29}$$

で与えらる．減衰率 (δ) と割引率 (α) をそれぞれ変化させることにより，静的問題，短期目標および長期目標の下での競争解における状態変数の値と各エージェントが獲得する効用の値をそれぞれ図**6**，**7**に示す．均衡する各エージェントの状態変数のレベルが高い場合には獲得する効用関数の値が低く，逆に状態変数のレベルが低い場合には，獲得する効用関数の値が高いことが分かる．すなわち，長期的な視点にたち，各エージェントが各世代において受け取る効用の割り

引きされた総和を最適にする問題においては，現時点の活動に対する価値と将来にわたっての活動に対する価値との相対比が大きな影響を及ぼす．特に，将来にわたって受け取る目標の価値が大きく減衰する場合には，現時点での状態変数のレベルを低く抑えようとし，逆に将来にわたって目標の価値があまり減衰しない場合には，現時点での状態変数のレベルを高くしようとする．また，将来にわたって受け取る目標の価値が大きく減衰する場合には，競争解は協調解に近づき，各エージェントが競争原理に基づいて行動する場合と協調原理に基づいて行動する場合との差がなくなることが分かる．

7. まとめ

本論文においては，エージェント間の相互作用を動学的観点から分析するための枠組みとして，分権型意思決定モデルを提案した．各エージェントは，競争原理または協調原理に基づき，自己の目標関数を最適にするための合目的な行動をとるものとし，それを分権型意思決定問題として分析した．さらに，静的および動的な分権型意思決定問題の均衡解として，競争原理の下での均衡解および協調原理の下での協調解をそれぞれ求めた．また，動的な問題に対しては，各エージェントが短期目標または長期目標に基づき行動をする場合について各種均衡解をそれぞれ求めた．また，協調解と競争的均衡解において各エージェントが依存する各目標関数の値の差によって協調効果を定義し社会におけるエージェントの数と協調効果関係について明らかにした．また，割引率等の動的要素と競争解や協調解との関係についても明らかにした．

参考文献

1) Ordeshook, P.C.: *Game Theory and Political Theory*, Cambridge University Press (1987).
2) 鈴村興太郎：経済計画論，筑摩書房 (1982).
3) 公文俊平：情報文明論，NTT 出版社 (1994).
4) Gasse, L.: Social Conception of Knowledge and Action: DAI Foundations and Open Systems Semantics, *Artificial Intelligence*, Vol.47, pp.107–135 (1991).
5) Shoham, Y.: Agent-oriented Programming, *Artificial Intelligence*, Vol.60, pp.51–92 (1993).
6) Barto, A. and Sutton, G.: *Learning and Sequential Decision-making, Learning and Computational Neuro Science*, MIT Press (1991).
7) 所真理雄：マルチエージェントシステム研究の目指すもの，日本ソフトウエア科学会誌，Vol.12, No.1, pp.78–86 (1995).
8) 石田　亨：エージェントを考える，人工知能学会誌，Vol.10, No.5, pp.3–7 (1995).
9) Tenney, R. and Sandell, N.R.: Strategies for Distributed Decision Making, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.AC-19, pp.236–247 (1974).
10) Basar, T. and Olsder, G.: *Dynamic Noncooperative Game Theory*, Academic Press (1982).
11) 鈴木光男：新ゲーム理論，頸草書房 (1994).
12) Namatame, A. and Tse, E.: Implicit Games: Analysis of Asymptotic Competitive Behaviors, *European Journal of Operations Research*, Vol.47, No.3, pp.387–393 (1990).

(平成 8 年 3 月 15 日受付)
(平成 8 年 9 月 12 日採録)

生天目　章（正会員）
1973 年防衛大学校卒業（応用物理学専攻）．1977 および 1979 年スタンフォード大学大学院修士および博士課程修了 (Ph.D.)．同年航空幕僚監部勤務．1987～1988 年ジョージメイソン大学客員助教授．現在，防衛大学校情報工学教室教授．人工知能，ニューラルネットワーク，意思決定工学等の研究に従事．人工知能学会，情報処理学会，ソフトウェア科学学会，神経回路学会，AAAI，ACM，IEEE 学会各会員．

濱川孝一郎（学生会員）
1991 年防衛大学校卒業（応用物理学科専攻）．1996 年同大学校研究科（オペレーションズリサーチ専攻）修了．現在，航空自衛隊研究開発集団勤務．情報処理学会，人工知能学会各会員．