

# 分散人工知能(2)：交渉と均衡化

## Distributed Artificial Intelligence (2) : Negotiation and Balancing

桑原 和宏\*

Kazuhiro Kuwabara

石田 亨\*

Toru Ishida

\* NTTコミュニケーション科学研究所  
NTT Communication Science Laboratories.

1992年11月2日 受理

**Keywords:** distributed artificial intelligence, negotiation, coordinated balancing.

### 1. はじめに

分散人工知能における典型的な課題として、2回にわたる解説では次の二つを取り上げている。

1. 協調問題解決：複数のエージェントが共通の目標を持つ場合に、エージェント間で協力し、組織を構成し、共通の目標を達成する。
2. 交渉と均衡化：複数のエージェントあるいはエージェントからなる組織群が独立の目標を持つ場合に、それらエージェント（組織）群の目標間に生じる競合を解消し、全体として好ましいバランスを維持しながら、それぞれの目標を達成する。

本稿では後者について解説する。前者の協調問題解決については文献[石田 92]を参照されたい。

複数のエージェントから構成されているシステム（マルチエージェントシステム）を検討する視点として、エージェント個々の振舞いに注目する見方と、システム全体としての社会的な側面に注目する見方がある。言い換えればミクロな観点とマクロな観点である。

独立の目標を持つエージェント群の振舞いはミクロな観点では交渉（negotiation）として、また、マクロな観点では均衡化（balancing）としてとらえることができる。以下、交渉と均衡化に関して、これまでに行われた研究を紹介する。

### 2. 交渉（Negotiation）

交渉は複数のエージェント間で合意を形成するため

\* 1 交渉の決裂もエージェント群の取り得る行動の組の一つとして表すことができる。

のプロセスである [Pruitt 81]。

エージェント  $i$  は  $m_i$  個の取り得る行動（戦略）の集合  $\{s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,m_i}\}$  を持つ。いま  $n$  個のエージェントが交渉に関わっているとする。 $n$  個のエージェントが取る行動の組  $(s_{1,j_1}, s_{2,j_2}, \dots, s_{n,j_n})$  に対して効用（utility）を与える効用関数（utility function）が各エージェントに定義されており、エージェントは各自の効用を最大にするように振る舞う。

交渉の結果得られる合意はすべてのエージェントが受け入れるエージェント群の行動の組  $(\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_n)$  として表される\*1。合意の候補となるエージェント群の行動の組を妥結案と呼ぶことにしよう。もし、すべてのエージェントの効用がある妥結案に対して最大になるのであれば、その妥結案が合意となるであろう。しかし、一般には必ずしもそうではなく、どのような妥結案を合意とするべきかは自明ではない。

また、交渉はエージェント間の通信によって行われるため、合意を形成するためにエージェント間でやりとりされるメッセージを定めるプロトコルが必要となる。

さらに、一般にエージェント間で効用関数が違うため、交渉の過程でエージェント間の競合（利害の対立）が生じる。競合を解決して合意に到達するためにエージェントは競合解決の知識を持つ必要がある。

このように交渉に関する主要な研究課題として(1)合意、(2)エージェントの効用関数、(3)交渉のプロトコル、(4)エージェントの競合解決知識の4点をあげることができる（図1）。以下、これらの課題に対する交渉の研究例を紹介する。

なお、本稿では計算機上に実現されるエージェント間の交渉を中心に論じる。本稿では深く立ち入らないが、人間の交渉形態はいろいろな着想を与えてくれる。

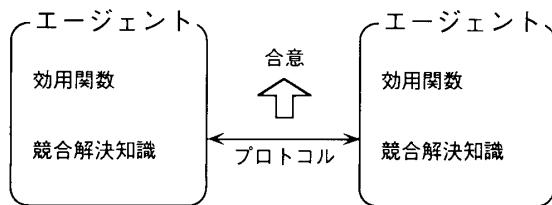


図1 交渉における主要な研究課題

文献 [Pruitt 81] は (組織) 心理学の立場から交渉のプロセスを論じている。また、数理的な立場からは、交渉によって合意を求める問題は各エージェントごとにその効用を最大にするという目的関数がある (すなわち、エージェントの数だけの目的関数が存在する) 多目的決定問題 (例えば文献 [市川 80]) としてもとらえることができる。

## 2・1 合 意

### (1) ゲーム理論における合意

ゲーム理論の中から協力可能な2人ゲームを紹介する (例えば、文献 [Harsanyi 77, 鈴木 81, 戸田 68])。このゲームは交渉における合意の性質を調べる出発点を与えてくれる。ゲーム理論ではプレイヤー  $i$  (エージェントに相当) の行動 (戦略) を、取り得る行動 (戦略)  $s_{i,j} (1 \leq j \leq m_i)$  を実際に採用する確率  $p_{i,j}$  の組  $(p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,m_i})$  として表現する (混合戦略)。さらに協力ゲームでは、プレイヤー間で相談してプレイヤーの行動の組に対して採用する確率を割り当てることができる。したがって、妥結案はプレイヤーの行動の組を採用する確率の組として表現され、妥結案の効用は期待値で与えられることになる。

プレイヤー1, 2の効用を  $u_1, u_2$  とすると、プレイヤー1, 2の取り得る効用の組  $(u_1, u_2)$  の集合  $R$  は図2に示すように2次元平面上に表すことができる<sup>\*2</sup>。ここで、両プレイヤーが協力することなしに得られる効用の組 (交渉の基準点と呼ぶ) を  $c = (c_1, c_2)$  とする。合意が成立する交渉の妥結点  $\bar{u}$  は次のような性質を満たすべきであると考えられている。

1. 個人合理性 (individual rationality) : 妥結点における各プレイヤーの効用は基準点の効用より大きい。したがって、図2では妥結点は  $c, d, e$  で囲まれた  $R$  の部分集合になる。
2. 共同合理性 (joint rationality) : 両プレイヤーの効用を両方ともさらに改善する効用の組が存在しない。

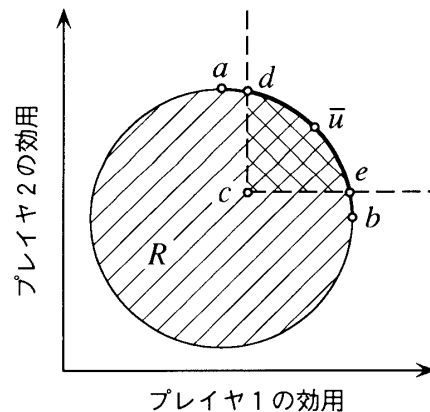


図2 プレイヤの効用 [Harsanyi 77]

い。したがって、図2では妥結点は  $d, e$  を通り、 $a, b$  を結ぶ円弧上に位置する。これはパレート最適 (Pareto optimum) とも呼ばれる。

この両者の性質を満たす点の集合は交渉領域 (negotiation set)<sup>\*3</sup> と呼ばれ、図2では  $d, e$  を結ぶ円弧に相当する。

上記の二つの性質のみでは妥結点  $\bar{u}$  は一意に決まらず、交渉領域の中からどの点を妥結点とするべきかが問題となる。これは交渉問題 (bargaining problem)<sup>\*4</sup> と呼ばれている。例えば、先にあげた個人合理性、共同合理性のほかに次のような条件を仮定すると、条件を満足する解が唯一定まることが知られている。

1. 効用  $(u_i)$  の正1次変換  $(u'_i = a_i u_i + b_i, a_i > 0)$  によって得られる問題の交渉の妥結点は、元の問題の交渉の妥結点に同じ正1次変換を施したものに等しい。例えば、プレイヤー1の効用を倍にしても交渉の妥結点におけるプレイヤー1の効用が倍になるだけで本質的には変化しない。
2. 問題が対称、すなわち、プレイヤーを入れ換えても同じ問題となる場合は妥結点における両プレイヤーの効用は等しい。
3. 効用の取り得る範囲を妥結点  $\bar{u}$ 、基準点  $c$  を含む  $R$  の部分集合に限定した問題においても妥結点は変わらない。すなわち、妥結点の近傍以外は交渉に影響を与えない。

この解  $\bar{u} = (\bar{u}_1, \bar{u}_2)$  は Nash の解と呼ばれ、各プレイヤーの基準点における効用との差の積を最大にするものになっている。すなわち、

$$(\bar{u}_1 - c_1)(\bar{u}_2 - c_2) = \max_{\substack{(u_1, u_2) \in R \\ u_1 \geq c_1 \\ u_2 \geq c_2}} (u_1 - c_1)(u_2 - c_2)$$

となる。

ゲーム理論ではこのほかにも基準点の決定自体にプレイヤー間の駆け引きがある場合などの種々の状況における妥結点が議論されている。また、文献 [佐伯 80]

\*2 協力ゲームを考えているので凸集合になる。

\*3 交渉集合と訳される場合もあるが、本稿では文献 [鈴木 81] に従う。

\*4 文献 [鈴木 81] では bargaining の訳語として交渉が使われており、本稿でもそれに従う。

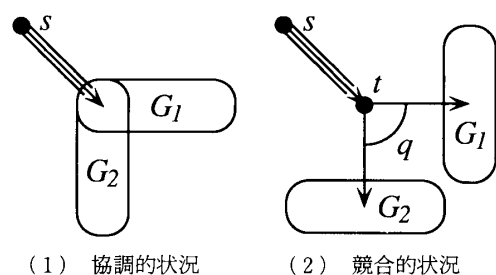


図3 拡張された妥結案 [Zlotkin 91a]

はゲーム理論における種々の妥結点を意思決定論の立場から論じている。

## (2) 妥結案の拡張

交渉領域が空の場合はどのように妥結点を決めたらよいであろうか？ 交渉領域の一点を妥結案としては妥結点は存在しないことになる。ゲーム理論をもとに、交渉メカニズムの確立を目指す一連の研究 [Zlotkin 89, Zlotkin 90, Zlotkin 91 a, Zlotkin 91 b] において、交渉領域が空の場合に妥結案をどのように扱っているかを紹介する。

この研究は、ある初期状態から各エージェントがそれぞれの目標状態に達するためのプランの作成を扱っている。プランには実行に要するコストが定義される。エージェントが異なる目標状態を持つ場合でも、両エージェントのプランの一部分を共同で実行することにより、各エージェントのコストを下げる事が期待できる。ここでの目的は、すべてのエージェントの目標が満足されるような共同プランを作成することである。

交渉領域が空でない場合（協調的状況：cooperative situation）と空の場合（競合的状況：conflict situation）とを直観的に表現したのが図3である。図の各点が状態に対応しており、領域  $G_1$ ,  $G_2$  はそれぞれエージェント 1, 2 の目標が満足される状態の集合を表す。s は初期状態を表し、エージェントが単独で目標を満足させるときのコストは s と目標を表す領域との距離で示されている。3重線は両エージェントの共同プランを表している。

協調的状況では図3(1)に示すように二つのエージェントの目標領域の共通部分が初期状態に近く、エージェント間で協力するのが有利であることがわかる。一方、競合的状況では二つの目標領域間に共通部分がなく、共同プランが成立しない\*5。そこで妥結案を次のように拡張する。まず、初期状態 s からある状態 t に

移行する混合共同プラン (mixed joint plan)  $J$  を考える。混合共同プランとは共同プランのどの部分をどのエージェントが実行するかを確率的に決定するものである\*6。さらに状態 t において確率  $q$  でどちらか一方の目標を選択することにする。この妥結案は  $(t, J, q)$  で表され、図3(2)に示すようになる。

このように確率  $q$  で一方の目標を達成するという考え方を導入し、妥結案を拡張することにより交渉領域が空の場合においても合意を定義することができ。拡張された妥結案は協調的状況にも適用可能である ( $t \in G_1 \cap G_2$  とすればよい) ので、これに基づいて協調的状況、競合的状況ともに適用可能な統合交渉プロトコル (unified negotiation protocol) が提案されている [Zlotkin 90, Zlotkin 91 a]。

## 2・2 効 用

妥結案に対する効用がエージェントに定義されていることが交渉の特徴である。交渉の経過に伴って効用関数に変化したり、交渉の経過時間が効用に影響を及ぼすことがあり得る。以下、相手の効用の変化を引き起こすような説得に関する研究と交渉の時間経過を効用関数に取り入れたモデルを紹介する。

### (1) 効用の変化を引き起こす説得案の生成

労働争議の調停を行う PERSUADER というシステムが提案されている [Sycara-Cyranski 85, Sycara 88, Sycara 89]。労働争議の交渉では最終的な妥結案が、もし仮に最初に提示されたとしても、それが両者に受け入れられるとは限らない。すなわち、交渉によって妥結案に対するエージェントの効用関数に変化すると考えられる。

PERSUADER は効用関数の変化に着目したシステムで具体的には次のことを行う。

- ・妥結案の生成
- ・受け入れられなかった妥結案の修正
- ・妥結案を受け入れさせるような説得案の生成

このシステムは事例ベース推論 (case-based reasoning)、多属性効用分析の活用などの特徴がある。以下では、エージェントの効用関数を変更させるための説得案の生成を説明する。エージェントは複数の目標（妥結案の評価項目）を持ち、それぞれの目標に重要度と効用がつけられている。エージェントはそれらの目標の観点から妥結案の効用を決定することになる。説得の方法として、懸案事項の重要度・効用を変化させる方法、または、脅迫的な説得、すなわち、懸案事項において譲歩しない場合はより重要度の高い目標が満たされないことを示す方法が考えられる。

\*5 二つの目標領域間に共通部分があるものの、共通部分のほう初期状態から遠いという妥協的状況 (compromise situation) も考えられているが、ここでは省略する。

\*6 エージェントの能力は同じで、どちらのエージェントもプランの任意の部分を実行できると仮定している。

付加給付 (fringe benefit) を上げるという組合の要求を会社が受け入れられないことを組合に対し説得することを例にとろう。脅迫的な説得案の生成は、以下のように行われる。基本的には付加給付上昇を会社が受け入れると、組合にとって付加給付より重要度の高い目標が達成できなくなることを示す。このような説得により相手が目標の重要度・効用を変化させることが期待できる。説得案の生成にはエージェントの信念構造 (belief structure) を表した目標木を利用する。図4に会社の信念構造を表す目標木を示す。節点は目標を表し、望ましい変化の方向 (+ または -) が付加されている。リンクは目標間の依存関係を表す。この目標木をもとに次のように説得案が生成される。

- ・付加給付の上昇は経済的特典 (ECONOMIC-CONCESSIONS), 労働コスト (LABOR COST), 生産コスト (PRODUCTION-COST) の上昇につながり, さらに利潤 (PROFIT) の減少につながる。
- ・利潤の減少を補うために会社は賃金 (WAGES) の低下, 雇用 (EMPLOYMENT) の低下, 工場の効率の向上, 販売の向上を図る。
- ・賃金 (重要度 4) の低下, 雇用 (重要度 7) の低下は組合の目標に反する。
- ・雇用という目標は付加給付 (重要度 5) より重要度が高い。

このようにして付加給付の上昇を会社が認めると, より重要度の高い雇用という目標が満足されなくなる恐れがあるという説得案が生成される。

## (2) 交渉の経過時間に伴う効用の変化

エージェントの効用関数に交渉経過時間の項を入れたモデルが提案されている [Kraus 91 a, Kraus 91 b]。

エージェント 1, 2 が仕事を分担して実行する状況を考える。\$s\_i\$ をエージェント \$i\$ の分担分とする (\$s\_1 + s\_2 = 1\$)。ここでエージェント \$i\$ の効用関数 \$u\_i\$ を自分の分担

分 \$s\_i\$ と交渉の経過時間 \$t\$ との関数とし, 例えば次のように定義する。

$$u_i(s_i, t) = (\delta_i)^t \times (1 - s_i)$$

ここで, \$\delta\_i\$ は \$0 < \delta\_i < 1\$ を満たす定数である。すなわち, 自分の分担分が少ないほど, また, 交渉の時間が短いほど, 効用が大きくなる。また, 交渉が決裂したときの効用は \$-\infty\$ とする。さらに 1 単位時間に一方のエージェントが相手に妥結案を提示するとする。提示を受けたエージェントは妥結案を受け入れるのであれば, そこで交渉は終了し, もし, 受け入れないのであれば (次の 1 単位時間に) 新たな妥結案を提示する。

このような状況においてエージェントの取るべき戦略 (提示する妥結案, および相手の妥結案を受け入れるか否かの判断) はどうなるだろうか? エージェントがある戦略 (\$E\$ とする) をとれば, 他のエージェントが \$E\$ 以外の戦略をとるのが不利になるという均衡戦略が考えられる。適当な仮定のもとでエージェントが妥結案を提示するどの段階においても, 均衡となる戦略 (完全均衡と呼ばれる) が存在し, それは一意に決まることが示されている。この戦略では最初に出す妥結案は相手のエージェントに直ちに受け入れられ, 交渉はすぐに終了する。

## 2・3 交渉のプロトコル

交渉にはエージェント間のメッセージのやりとりが伴う。以下, 交渉におけるメッセージの種類, 内容を取り上げた研究例を紹介する。

また, 交渉プロトコルの設計において, デッドロックを起こしたり, 交渉の結果エージェント間で矛盾が生じないことを検証する必要がある。プロトコル検証技術の研究例としては文献 [Kreifelts 91] があげられる。

### (1) 契約ネットプロトコル (Contract-Net Protocol)

契約ネットプロトコル [Davis 83, Smith 80, Smith 81] は分散問題解決においてタスク割当てを行うプロトコルである。タスク提示 (task announcement), 入札 (bid), 落札 (award) などのメッセージによってタスクをノード (エージェントに相当) に分配する。

タスクを持つノードはマネジャ (manager) となりタスク提示メッセージを放送する。実行すべきタスクを持たないノードは, 提示されたタスクを実行しようとする場合は入札メッセージをマネジャに送る。マネジャは送られてきた入札メッセージのなかから最も適当と判断するノードに対して落札メッセージを送る。落札メッセージを受け取ったノードはコントラクタ (contractor) としてタスクを実行する。このメッセー

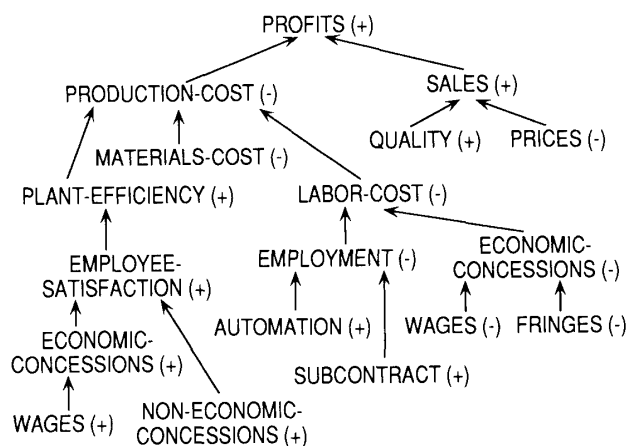


図4 会社の信念構造を表した目標木 (一部) [Sycara 89]

ジの交換を通してタスクの分配が実現される。

契約ネットプロトコルではノードは各自の観点からタスク割当ての情報を評価し、最終的に得られるタスクの割当ては、マネジャとコントラクタが共同で選択 (mutual selection) したものになる。いわばノード間の情報交換の結果、タスク割当て交渉の合意として得られたと考えられる。

## (2) マルチステージネゴシエーション (Multi-stage Negotiation)

マルチステージネゴシエーションは複数のエージェントが協調して資源の割当てを行うための手法である [Conry 88, Conry 91, 桑原 91]。マルチステージネゴシエーションは、通信網において通信路が故障した場合の代替パスの探索を例題として研究された。通信網は複数の地域に分割され、おのおののエージェントが担当地域内の通信路の割当てに責任を持つ。どのエージェントも通信網全体の情報を持たず、各自の局所的な資源の割当てを他のエージェントに通信し、他エージェントの割当てが自分のところに及ぼす影響を互いに通知し合うことによって全体として整合のとれた資源の割当てを行う。

マルチステージネゴシエーションは契約ネットプロトコルの一種の拡張と考えられる。契約ネットプロトコルでは一回のタスク提示、入札、落札というプロセスでタスクの割当てを行っているのに対し、マルチステージネゴシエーションでは、局所的な資源割当ての影響に関して交換した情報をもとに、必要に応じて資源割当てをやり直す。これによって大域的な制約を満足する割当てを実現している。また、制約が強すぎて、すべての制約を満足する解が存在しない場合に対応するためのメッセージが定義されている。さらに、過制約の場合、ある目標を満足することをあきらめて残りの目標を満足させることを可能にしている。

### 2・4 競合解決知識

競合解決知識の典型的な例は複数のエージェントがそれぞれの専門知識を持ち、協調して設計を行うシステムに見られる。これはエージェントが自分の専門知識の視点から設計案の評価 (効用を決めることに相当) するため、エージェント間で評価が違い (競合)、合意のとれた設計案を形成するのが容易ではないからである。

#### (1) CDE

協調設計システムCDE (Cooperative Design Engine) では、従来、設計知識のなかに埋め込まれていた競合解決知識を設計知識から取り出し、独立させている。これにより競合解決知識を一般化でき、少ない競合

解決知識で多くの種類の競合に対処することができる [Klein 91]。

このシステムの特徴は競合を階層的に分類 (クラス分け) していることである。競合知識はクラスに含まれるための前提条件と、そのクラスに分類される競合に対する解決策から構成される。

CDE では競合解決プロセスを発見的分類 (heuristic classification) [Clancey 84] とみなしている。処理の流れは次のようになる。

1. 発生した競合のクラスを同定するために、その原因となる設計データ、設計の根拠を競合解決知識の記述のレベルに抽象化する。
2. 競合クラスの階層を、より一般的なものから具体的なものへと探索し、発生した競合のクラスを同定する。
3. 同定されたクラスより競合解決策を取り出す。
4. 競合解決策を実際の状況に合うように修正し、競合解決プランを作成する。

#### (2) CEF

協調エキスパートシステムの枠組み CEF (Cooperating Experts Framework) [Lander 90] は前述の CDE と同様に協調設計を対象にしており、競合解決の方式をエージェント内で新たな局所解 (エージェントの設計案に相当) を探索する方式と、エージェント間にまたがる制約を緩和する方式とに分類している。CDE では、問題解決の状況 (例えば、局所的な探索が十分行われたかどうか) が競合の分類に必ずしも反映されてはいなかった。CEF では、エージェントの局所解の探索が十分行われておらず、新たな解が見つかることが期待できる場合には局所解を探索し、これ以上新たに局所解を生成するのが困難な場合には制約を緩和する。

また、競合解決知識として人間の交渉過程 [Pruitt 81] から抽出した競合解決手続き (例えば、重要度の低い制約を無視するなど) を定義し、資源の再割当て、プロジェクト管理へ応用した研究が報告されている [Sathi 86, Sathi 89]。

### 3. 均衡化 (Balancing)

交渉では個々のエージェント間のやりとりが興味の対象であるのに対して、均衡化では数多くのエージェントの集団としての振舞いが議論される。全体の振舞いの説明が興味の対象であるが、工学的な立場からはさらに個々のエージェントの振舞いの制御を通して、いかに全体の振舞いを制御するかが課題となる。

ここでは均衡化の研究手法として次の二つを取り上

げる。一つは経済学を応用するものである。経済はもとも情報・制御が分散しており、問題の設定がマルチエージェントシステムにおける均衡化と共通している。しかも、数理的な解析が多く行われてきており、その結果を利用することができる。経済の考え方を応用したものとしては例えば Agoric システム<sup>\*7</sup>と呼ばれる市場原理に基づく計算モデルとそのモデルを利用したソフトウェアの枠組みがある [Drexler 88, Miller 88]。

もう一つの考え方は、エージェント集団を一つの生態系として考えるものである。システムの振舞いを決定するエージェント間の相互作用を調べる計算生態学 (computational ecology) という概念が提唱されている [Huberman 88]。

以下、経済 (特に市場経済) モデルを応用した研究例と計算生態学の研究例を紹介する。特に局所的な制御を通していかに全体の制御を実現するかという側面から述べる。

### 3・1 市場経済モデル

#### (1) 契約ネットプロトコルに基づく負荷分散

LAN でつながれたワークステーション間でタスクのスケジューリングを行う Enterprise というシステムが提案されている [Malone 88]。前述の契約ネットプロトコルと同様にタスク提示、入札、落札のメッセージによりタスクをワークステーションに割り当てる。ワークステーションが契約ネットプロトコルにおけるノード (エージェント) に相当する。ある方針 (例えば、短い処理時間のタスクを優先するなど) に従ってタスクには優先度がつけられる。ノードは提示されたタスクの優先度に基づいてタスクを選択する (入札)。また、マネジャは入札メッセージにおけるタスクの実行時間の見積りに基づいてコントラクトを選択する (落札)。

一般の分散スケジューリングでは、(1)タスクの発生源であるノード (マネジャ) がタスクをどのノードで実行するかを決めるタスク源主導 (source-initiative) と、(2)サーバ (コントラクトに相当) がどのタスクを処理するかを決めるサーバ主導 (server-initiative) の2種の方式が考えられる。システムの負荷が低いときはタスク源主導のほうが有利で、負荷が高いときはサーバ主導のほうが有利であることが知られている。Enterprise では負荷が低いときはタスク提示に対し

多くの入札がただちに到着し、タスク源であるマネジャは多くの入札の中からコントラクトを決めることができる (タスク源主導)。一方、負荷が高いときはサーバは処理に忙しく、実行すべきタスクがなくなった時点で次に実行するタスクを決定し、入札のメッセージを送る (サーバ主導)。このようにして Enterprise は負荷の変化に応じて2種類の方式間を自然に移行することができる。

#### (2) 競売による負荷分散

分散システムにおける負荷分散に市場経済の考え方を応用した例が報告されている [Ferguson 88]。この研究ではプロセッサ間でジョブを移動させ、負荷分散を実現する。各プロセッサとシステムに入力される各ジョブがエージェントとなる。あらかじめ与えられた資金を用いてジョブはプロセッサからジョブ実行に必要な CPU 時間を購入する。他のプロセッサに移動するときはプロセッサ間の通信路を購入することになる。

Enterprise では価格が導入されていなかったのに対し、この研究では CPU 時間、通信路という異なる資源を価格という統一の指標で扱っている。

CPU 時間と通信路の価格は競売 (auction) によって決められ、プロセッサは自分の利潤を最大にするように CPU 時間と通信路を販売する。これに対しジョブの目的は与えられた資金を用いてジョブを完了させることで、(1)できるだけ安くジョブを実行する価格優先方式、および、(2)ジョブの終了時間をできるだけ短くするサービス時間優先方式が検討されている<sup>\*8</sup>。

個々のジョブの完了に要する時間は指数分布に従うとし、最初に与える資金の額は同じという条件でシミュレーションが行われた。その結果、ジョブがいずれの方式を採用した場合でも、ジョブの平均待ち時間が短くなることが示されている。すなわち、各エージェントがシステム全体としての目標は考慮に入れずに利己的に振る舞っても、全体としては目的の振舞いが達成されているわけである。

また、ジョブが採用する方式を変えるとプロセッサ間を移動するジョブの性質 (ジョブ完了に要する時間) が異なる傾向が見られ、エージェントの局所的な方式を変えることでシステム全体の振舞いを制御できることを示している。

#### (3) 資金量に基づくタスク間の優先度の制御

LAN でつながれたワークステーションのタスク管理を行う Spawn というシステムにおいても市場経済的なアプローチが試みられている [Waldspurger 92]。Spawn ではワークステーション (プロセッサ) と応用プログラム (ジョブ) がエージェントに対応し、プロ

\* 7 Agoric はギリシャ語で集会場、市場を意味する agora に由来している。

\* 8 二つの方式案の混合も考えられているが、その性質は2方式の中間的なものになる。

セッサの CPU 時間が売買される。ジョブは、いくつかのサブタスクに分解され実行される。与える資金の量を制御することによりジョブやサブタスク間の優先度を与えているのが特徴である。

資金量で優先度を表現することにより、例えば性能の違うプロセッサがある場合でも、プロセッサ間の性能の違いを考慮することなく（性能の差は CPU 時間の価格の差に現れる）、優先度を与えることができる。ジョブに渡された資金は、それぞれのサブタスクの優先度に従って分配される。実際の LAN 環境における実験の結果、分配された資金にほぼ比例した CPU 時間がサブタスクに割り当てられることが確かめられている。また、初めに渡す資金を調整することでジョブ間の優先度を制御できる。例えば、豊富な資金が与えられたジョブは CPU 時間の多くの割合を占有して実行されることが示されている。

#### (4) 市場指向プログラミング (Market Oriented Programming)

一般均衡論（例えば文献 [奥野 88]）に基づいた市場指向プログラミングが提案され、WALRAS と呼ばれるプログラミング環境が実装されている [Wellman 92]。WALRAS は非集中制御のもとでの資源などの割当問題を対象としており、市場メカニズムを通して割当てを実現する。市場は(1)財、(2)エージェント（消費者、生産者）、および、(3)エージェントの入札の戦略で定義される。市場の定義がプログラムに相当し、プログラムの実行は定義された市場から均衡状態を計算することに相当する。

一般均衡論では相互に関係する多数の財の需要と供給を同時に扱う。適当な仮定のもとで需要と供給が等しくなる均衡状態（均衡価格）が存在することが知られている。競争市場（仮定の一つ）ではエージェントは財の価格は決定されたものとして行動し、その結果である競争均衡ではパレート最適になることが知られている。

WALRAS の動作を積荷の輸送計画生成を例にとって説明しよう。地点を節点とし地点間を結ぶ輸送サービスをリンクとする輸送ネットワークを考える。積荷をどのようにネットワーク上に割り当てて輸送するかが問題である。エージェントとして消費者（荷主）、および、生産者（運送人）を考える。リンクごとに運送人が割り当てられ、輸送サービスを販売する。荷主は運送人から必要な輸送サービス（財に相当）を購入し、積荷の地点間の輸送を実現する。

それぞれの財に競売が対応づけられる。エージェントは入札対象である財の需要量（または供給量）をその財の価格の関数として表したものを入札する。運送

人は自分の利潤を最大にしようとし、荷主は少ない費用で、できるだけ多くの積荷を輸送しようとする。

競売では入札された関数から需要と供給が一致するような価格の計算される。新たな入札が行われると価格の計算がやり直される。入札する関数の計算では入札対象以外の財の価格を一定としているため、それらの価格が変更されると新たに入札をやり直すことになる。

均衡状態では全体での輸送に要した費用の総和（荷主の使った費用から運送人の利潤を引いたもの）が小さくなることが示されている。このようにして非集中制御のもとで、全体として目的の解を得ることができる。

また、このほかにも市場経済の考え方は通信網における資源割当て（パスの設定問題）などへの応用が研究されている [Kuwabara 92]。

### 3・2 計算生態学 (Computational Ecology)

計算生態学では知識が不完全で情報の遅延があるなかで、集中制御なしに行動するエージェント集団の動的な振舞いを調べている。ここでは、まず、計算生態学での出発点となっている単純なモデル [Huberman 88] を述べ、次にシステムが示すカオス的な振舞いを抑制する手法 [Hogg 91] を述べる。

#### (1) 単純なモデル

資源 1, 2 があり、各エージェントはどちらかより好ましい資源を使用するとする（これは二つの戦略があり、各エージェントがどちらかの戦略をとる問題と考えてもよい）。時刻  $t$  における資源 1 を使用するエージェントの割合  $f(t)$  の時間変化を調べよう。個々のエージェントがどのようにして判断するかは考えず、確率  $\rho$  で資源 1 を好むとする。この確率  $\rho$  を資源 1 を使用するエージェントの割合  $f(t)$  の関数とすると、資源 1 を使用するエージェントの数によって資源 1 を使用することの利得が変化する状況を表現することができる（例えば、資源 1 が量が少なく貴重なものであることを表現するには  $f(t)$  が大きくなると  $\rho$  が小さくなるようにすればよい）。ここで、 $\alpha$  をどちらの資源を使用するかを判断し直す単位時間当りの回数とすると、システムの振舞いを表現する次の式が導かれる [Huberman 88]。

$$\frac{df(t)}{dt} = \alpha(\rho - f(t)) \quad (1)$$

例えば、 $\rho$  を定数  $\rho_0$  とすると

$$f(t) = \rho_0 - (\rho_0 - f(0))e^{-\alpha t}$$

となり、 $f(t)$  の値は  $\rho_0$  に収束することがわかる。

ここで、確率  $\rho$  の定義を変えることにより、情報の不確実性や遅延を表現することができる。例えば  $\rho$  に

ばらつきを持たせることで情報の不確実性を表現できる。また、 $\rho$ を $f(t)$ の関数とする際に、時間遅れ $\tau$ を用いて時刻 $t-\tau$ における $f(t-\tau)$ の値を使って $\rho$ を表すことにより情報の遅延を表現することができる。

## (2) カオス的な振舞いの抑制

$\rho$ を $f(t)$ の関数として(すなわち、資源使用の利得がその資源を使用するエージェントの数で決まるとして)、式(1)に基づいて $f(t)$ の値を計算すると、遅延と不確実性が少ないときは $f(t)$ の値は収束するが、そうでない場合は振動、またはカオス的な振舞いを起こす。そこでカオス的な振舞いを抑制する方法が提案されている [Hogg 91]。

基本的な考え方はシステムにいろいろな種別のエージェントを導入することにより多様性をもたらすことである。報酬のメカニズムを導入し、環境の変化に対応してシステム内の各種のエージェントの比率を変化させることによってシステムの安定性を実現する。報酬は利得の多いエージェントの種別の割合を増やすことに対応させる。報酬を与えるための具体的な仕組みはすでにあるものとし、報酬が与えられた結果のみを考えることにすれば、エージェントが種別 $s$ になる確率 $\eta_s$ を種別 $s$ のエージェントの利得に比例させればよい。

この研究では情報の遅延時間の違いで複数のエージェントの種別を設けており、式(1)のモデルでカオスが発生する場合と同じパラメータで、報酬メカニズムを導入したときの振舞いが計算されている。その結果、十分多くの種別を導入するとき、カオス的な振舞いを示す時間が少なく安定状態に至ることが示されている。

## 4. お わ り に

交渉と均衡化の観点からいくつかの研究を紹介し

た。この分野ではまだ理論体系が十分に確立されているわけではない。いろいろな切口から個別のテーマに取り組んでいるのが現状である。ここで紹介した研究はゲーム理論、心理学、経済学などさまざまな分野のアイデアを取り入れている。分散人工知能の研究はまさに種々の研究分野のつぼ (Melting Pot) [Durfee 91] という形容がふさわしい。研究を進展させ、理論体系を構築していくためにも関係分野から多く学んでいく必要があろう。

また、計算機(人工物)だけから構成されるシステムのみならず、人間をも含んだシステムにおいても交渉と均衡化の考え方は応用できる。例えば前述の協調設計システム CDE の長期的な目標は機械の設計エージェントだけではなく、人間の設計者をも含んだ協調設計システムの実現である [Klein 91]。その意味では CSCW (Computer Supported Cooperative Work) にも関連が深い。また、経済モデルの応用では分散システム内に閉じた資源割当てだけではなく、例えばソフトウェアの出版・流通などの人間の経済活動をも含めた市場を構成することが示唆されている [Miller 88]。

人工知能が個々の知能を人工的に実現するのに対し、分散人工知能では社会に見られる知的な振舞いを人工的に実現しようとする。したがって、人工物に閉じたシステムばかりではなく、人間をも含んだシステムの実現が大きなテーマになってこよう。

## 謝 辞

日頃より御指導いただく NTT コミュニケーション科学研究所西川清史所長、中野良平グループリーダー、御討論いただいた同所の赤埴淳一氏、横尾 真氏、西部喜康氏に感謝致します。

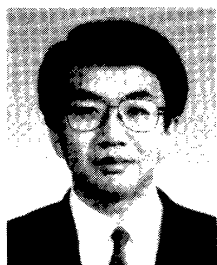
## ◇ 参 考 文 献 ◇

- [Clancey 84] Clancey, W. J.: Classification Problem Solving, *AAAI-84*, pp. 49-55 (1984).
- [Conry 88] Conry, S. E., Meyer, R. A. and Lesser, V. R.: Multistage Negotiation in Distributed Planning, in Bond, A. H. and Gasser, L., eds. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, pp. 367-384, Morgan Kaufmann (1988).
- [Conry 91] Conry, S. E., Kuwabara, K., Lesser, V. R. and Meyer, R. A.: Multistage Negotiation for Distributed Constraint Satisfaction, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1462-1477 (1991).
- [Davis 83] Davis, R. and Smith, R. G.: Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving, *Artif. Intell.*, Vol. 20, No. 1, pp. 63-109 (1983).
- [Drexler 88] Drexler, K. E. and Miller, M. S.: Incentive Engineering for Computational Resource Management, in Huberman, B. A., ed. *The Ecology of Computation*, pp. 231-266, Elsevier Science Pub. (1988).
- [Durfee 91] Durfee, E. H.: The Distributed Artificial Intelligence Melting Pot, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1301-1306 (1991).
- [Ferguson 88] Ferguson, D., Yemini, Y., and Nikolaou, C.: Microeconomic Algorithms for Load Balancing in Distributed Computer Systems, *8th Int. Conf. Distributed Comput. Syst.*, pp. 491-499 (1988).
- [Harsanyi 77] Harsanyi, J. C.: *Rational Behavior and Bargaining Equilibrium in Games and Social Situations*, Cambridge University Press (1977).
- [Hogg 91] Hogg, T. and Huberman, B. A.: Controlling



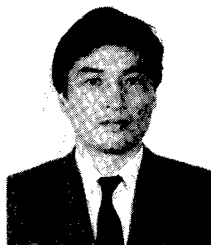
- Chaos in Distributed Systems, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1325-1332 (1991).
- [Huberman 88] Huberman, B. A. and Hogg, T.: The Behavior of Computational Ecologies, in Huberman, B. A., ed. *The Ecology of Computation*, pp. 77-115, Elsevier Science Pub. (1988).
- [市川 80] 市川惇信 編: 多目的決定の理論と方法, 計測自動制御学会 (1980).
- [石田 92] 石田 亨, 桑原和宏: 解説: 分散人工知能(1)協調問題解決, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, pp. 945-954 (1992).
- [Klein 91] Klein, M.: Supporting Conflict Resolution in Cooperative Design Systems, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1379-1390 (1991).
- [Kraus 91a] Kraus, S. and Wilkenfeld, J.: The Function of Time in Cooperative Negotiations, *AAAI-91*, pp. 179-184 (1991).
- [Kraus 91b] Kraus, S. and Wilkenfeld, J.: Negotiations Over Time in a Multi-Agent Environment: Preliminary Report, *IJCAI-91*, pp. 56-61 (1991).
- [Kreifelts 91] Kreifelts, T. and von Martial, F.: A Negotiation Framework for Autonomous Agents, in Demazeau, Y. and Müller, J.-P., eds. *Decentralized A. I. 2*, pp. 71-88, North-Holland (1991).
- [桑原 91] 桑原和宏, Lesser, V. R.: マルチステージネゴシエーションにおけるゴール間競合の検出, 情処学論, Vol. 32, No. 10, pp. 1269-1280 (1991).
- [Kuwabara 92] Kuwabara, K. and Ishida, T.: Symbiotic Approach to Distributed Resource Allocation: Toward Coordinated Balancing, *Pre-Proc. MAAMAW '92* (1992).
- [Lander 90] Lander, S., Lesser, V. R. and Connell, M. E.: Conflict Resolution Strategies for Cooperating Expert Agents, in Deen, S. M., ed. *CKBS '90: Proc. Int. Working Conf. Cooperative Knowledge Based Systems*, pp. 183-200, Springer-Verlag (1990).
- [Malone 88] Malone, T. W., Fikes, R. E., Grant, K. R. and Howard, M. T.: Enterprise: A Market-like Task Scheduler for Distributed Computing Environments, in Huberman, B. A., ed. *The Ecology of Computation*, pp. 177-205, Elsevier Science Pub. (1988).
- [Miller 88] Miller, M. S. and Drexler, K. E.: Markets and Computation: Agoric Open Systems, in Huberman, B. A., ed. *The Ecology of Computation*, pp. 133-176, Elsevier Science Pub. (1988).
- [奥野 88] 奥野正寛, 鈴木興太郎: ミクロ経済学II, 岩波書店 (1988).
- [Pruitt 81] Pruitt, D. G.: *Negotiation Behavior*, Academic Press (1981).
- [佐伯 80] 佐伯 胖: 「きめ方」の論理—社会的決定理論への招待—, 東京大学出版会 (1980).
- [Sathi 86] Sathi, A., Morton, T. E. and Roth, S. F.: Calisto: An Intelligent Project Management System, *AI Magazine*, Vol. 7, No. 5, pp. 34-52 (1986).
- [Sathi 89] Sathi, A. and Fox, M.: Constraint-Directed Negotiation of Resource Reallocations, in Huhns, M. N. and Gasser, L., eds., *Distributed A. I. 2*, pp. 163-193, Morgan Kaufmann (1989).
- [Smith 80] Smith, R. G.: The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, *IEEE Trans. Computers*, Vol. 29, No. 12, pp. 1104-1113 (1980).
- [Smith 81] Smith, R. G. and Davis, R.: Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 11, No. 1, pp. 61-70 (1981).
- [鈴木 81] 鈴木光男: ゲーム理論入門, 共立出版 (1981).
- [Sycara 88] Sycara, K. P.: Resolving Goal Conflicts via Negotiation, *AAAI-88*, pp. 245-250 (1988).
- [Sycara 89] Sycara, K. P.: Argumentation: Planning Other Agents' Plans, *IJCAI-89*, pp. 517-523 (1989).
- [Sycara-Cyranski 85] Sycara-Cyranski, K.: Arguments of Persuasion in Labor Mediation, *IJCAI-85*, pp. 294-296 (1985).
- [戸田 68] 戸田正直, 中原淳一: ゲーム理論と行動理論, 共立出版 (1968).
- [Waldspurger 92] Waldspurger, C. A., Hogg, T., Huberman, B. A., Kephart, J. O. and Stornetta, W. S.: Spawn: A Distributed Computational Economy, *IEEE Trans. Software Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 103-117 (1992).
- [Wellman 92] Wellman, M. P.: A General-Equilibrium Approach to Distributed Transportation Planning, *AAAI-92*, pp. 282-289 (1992).
- [Zlotkin 89] Zlotkin, G. and Rosenschein, J. S.: Negotiation and Task Sharing Among Autonomous Agents in Cooperative Domains, *IJCAI-89*, pp. 912-917 (1989).
- [Zlotkin 90] Zlotkin, G. and Rosenschein, J. S.: Negotiation and Conflict Resolution in Non-Cooperative Domains, *AAAI-90*, pp. 100-105 (1990).
- [Zlotkin 91a] Zlotkin, G. and Rosenschein, J. S.: Cooperation and Conflict Resolution via Negotiation Among Autonomous Agents in Noncooperative Domains, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1317-1324 (1991).
- [Zlotkin 91b] Zlotkin, G. and Rosenschein, J. S.: Incomplete Information and Deception in Multi-Agent Negotiation, *IJCAI-91*, pp. 225-231 (1991).

## 著者紹介



桑原 和宏 (正会員)

1982年東京大学工学部電気工学科卒業。1984年同大学院電子工学専門課程修士課程修了。同年、日本電信電話公社入社。以来知識ベースシステム、分散協調問題解決などの研究に従事。1988年9月より1年間 University of Massachusetts at Amherst 客員研究員。現在、NTTコミュニケーション科学研究所(京都)主任研究員。情報処理学会、電子情報通信学会各会員。



石田 亨 (正会員)

1976年京都大学工学部情報工学科卒業。1978年同大学院修士課程修了。同年、日本電信電話公社電気通信研究所入所。横須賀研究所においてソフトウェア工学、ファームウェア工学、知識工学などの研究開発に従事。1983年から84年にかけて、米国 Columbia 大学計算機科学科客員研究員。現在、NTTコミュニケーション科学研究所(京都)主幹研究員。工学博士。人工知能、特に分散人工知能に興味を持つ。情報処理学会、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、AAAI各会員。