



## The Emergence and Collapse of the Self Monitoring Center in Multi-agent Systems

西川, 麻樹

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2008-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4176

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004176>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

氏 名 西川 麻樹  
博士の専攻分野の名称 博士（理学）  
学 位 記 番 号 博い第 374 号  
学位授与の要 件 学位規則第 5 条第 1 項該当  
学位授与の日 付 平成 20 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

The Emergence and Collapse of the Self Monitoring Center in Multi-agent Systems (マルチエージェントシステムにおける中枢の生成)

審 査 委 員

主 査 教 授 郡司 幸夫  
教 授 中川 義次  
教 授 乙藤 洋一郎

エージェント・ペースト・モデルの研究では、伝統的に中心のない、分散的なシステムにおける機能の創発が扱われてきた。すなわち、複数の限定された知能を持つエージェントが相互作用することで、全体として何らかの協調を達成するが、それを指揮するような中枢は存在しない、というような状況の出現である。むしろ、これらの研究においては、中枢が存在しないにも関わらず巧妙な協調が達成されることへの驚きが研究の主題であったともいえる。

しかし、現実の複雑なシステムの中には、制御を担う单一の中心が存在する場合がある。たとえば脳と身体、細胞と核、組織とリーダーなどである。これらのシステムには、1) システムの部分にある中枢によって全体の協調関係が制御されていること、2) 中枢部分に全体の粗い縮図となるような情報が保持されていること、3) 多くの場合、そのような中枢は一つであること、というような共通する特徴がみられる。こうした特徴は、組織、生物、社会といった対象となるシステムの詳細を無視した形式的な取り扱いが可能であるように思われる。

だが、上述のような特徴を持つ中枢が創発することを示すモデルは我々の知る限り、過去に提示されていない。そこで、ここでは、問題を絞り、エージェント・ペースト・モデルにおいて上述のような特徴を持つ中枢的エージェントが創発する条件はどのようなものかシミュレーションすることを目指した。最初のモデルでは中枢の生成を扱い（上述の1）、2）、次のモデルでは複数の中枢が存在する場合におけるその統一（上述の3）について扱った。

#### モデル1：貨幣と権力のアナロジーに基づいたモデル

貨幣の創発モデルにおいては、エージェント同士の物物交換を通じて、交換を媒介する特殊な物が出現するという状況をモデル化していることが多い。ここでは、その「交換」に以下のよき解釈を加え、中枢の創発するモデルを作っていく。ある種の脳のモデルでは、モジュール間に計算の協調関係がみられるが、これは一種の交換関係とみなすことができる。つまり、Aモジュールの計算結果はBモジュールの計算に使われ、逆にBモジュールの計算結果はAモジュールの計算に使われる。このような計算結果の交換を行うことで、両方のモジュールの計算の収束が速くなるような状況が存在する。組織論的な文脈でいえば、これは各エージェントが自分の仕事を達成するのにお互いの仕事の結果を必要とするような状況といえよう。

このような状況でポイントになるのは、自分の必要とする情報や機能を持っている相手が、必ずしも自分の持っている情報を必要としておらず、通常は交換が成立しないことである。

このような状況を解決するために「権威」という概念を導入する。要求交換時に要求依頼者Aの要求実行者Bの中での権威がある閾値以上のとき、要求依頼者Aの命令を要求実行者Bは実行するが、要求実行者Bの要求は、その場では実行されない。そのかわり、ここでBは、将来誰か自分の要求を実行できるエージェントに紹介されることを期待してAに、自分の能力と要求を一時的に預ける。そしてAは委任された要求や能力を用いて他の交換に参加することができる。このような素過程を反復することで突出した権威を持ったエージェント内部に多数の要求と能

力が蓄えられ、結果としてこのエージェントを媒介として交換が成立する可能性が上昇する。このことは、ある特定のエージェントの内部にシステムの要求と能力の分布状態を反映する情報が詰め込まれ、そのことによってシステム全体の機能が変化したことを意味する。エージェント達は権威のあるエージェントに従うことで、間接的に自分の要求を実行させることができる。結果として、システム全体の粗い縮図を有する特殊なエージェントが、命令を次々に下していくという状況の出現がみられることになる。

#### モデル2：情報の統合可能性に基づいたモデル

上述のモデル1では、中枢となるエージェントは、パラメータの与え方によって、一つあるいは複数（ただしエージェント数に対してはごく少数）出現する。しかし、前述のように現実の中枢的要素は、多くの場合单一である。その理由を研究するため、人間の組織の抱える特徴を抽象化したゲームを考案した。その特徴とは著名な経済学者であるK. J. Arrowが『組織の限界』の中で指摘したものである。すなわち、1) 各エージェントは協力することで利益を得られる。しかし、2) 最適な協力のパターンに関する情報は、エージェント間に分散し断片的に蓄えられている。つまり、各エージェントは自分がどのように振る舞うと最高の利得を得られるのか知らない。しかし、他のエージェント達の振る舞いに関してどのように振る舞うのが最適かに関する断片的な知識を持っている場合がある、というものである。つまりシステム全体に関する情報を抱えるエージェントが複数存在するとき、どのように知識を伝達するのかという問題、誰が意志決定を行うと最適な協調行為が達成できるのかという問題が出現する。

そこで、我々はエージェントが自分の行動についての意志決定を、ある特定の他のエージェントに委任すると共に、自分の持つ協調行為に関する断片的知識を委譲し、委譲されたエージェントは、無矛盾に統合可能な情報は可能な限り統合して、自分に委譲してきたエージェント達に行動の指示を与える、という形で行うモデルを考案した。エージェントが誰に委任し、誰から委任されるのかという関係はネットワーク構造をなす。このネットワーク構造を遺伝的アルゴリズムで進化させると多くのエージェントから知識を委譲されたシステム全体の協調行動を決定する立場に立つエージェントが出現する。このことは、システムに関する情報の保持者が複数いた場合には、それらを統合するような傾向がある条件下ではみられるということを意味する。

以上の二つのモデルによって示された中枢の発生と統一は、現在のモデルでは、具体的なタスクとは結びついていない。しかし、そのようなタスクを実装することは可能であり、その際に中枢の発生、統一のモデルは自律分散的に現れる機能（多くは並列的計算）と、シンボリックな計算による機能（多くは直列的計算）を融合したようなシステムを創発させるための指針として役立つと思われる。

氏名	西川 麻樹		
論文題目	The Emergence and Collapse of the Self Monitoring Center in Multi-agent Systems マルチエージェントシステムにおける中枢の出現・生成		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	郡司 幸夫
	副査	教授	中川 義次
	副査	教授	乙藤 洋一郎
	副査		
	副査		
要旨			

本研究は、「意思決定可能なエージェント集団の中から、集団全体の挙動を左右する単独のエージェント（これを中枢と呼ぶ）が出現するか否か」について、シミュレーションを通して評価し、中枢出現の条件を示したものである。ここでエージェントは、各自に固有の作業能力を有するロボットと想定される。エージェント間の相互作用は、二つの形式で定義された。第一の定義では、エージェントは各タイムステップでランダムに他のエージェントと重複を許さないようにペアをつくり、ペア内で作業能力の交換を行う。第二の定義では、各エージェントは一方から他方へ情報の流れをつくり、受け手側の重複を許してよいとする。この定義により、相互作用集団は有向グラフで表されることになる。エージェント間に作業能力に関する情報が一方から他方へ流れることがここでの相互作用である。この二つの場合それぞれについて、モデル化し、シミュレーションして結果を得ている。

第1章は序論であり、研究史について述べている。中枢の例として、社会の中の権力の発生、多細胞生物個体における脳や神経節の発生、経済社会の中での貨幣の出現などがとりあげられる。これらの各論に簡単に触れるとともに、全体に通底する中枢概念が何であるのかが論じられる。社会における権力は、それ以外の大多数の者に命令しこれを隸従させる者で、権力者とそれ以外の者の間には支配・被支配という圧倒的な非対称性があるようになる。しかし社会生物学の知見は、女王アリ・働きアリの関係ですら、作業を効率化させる一種の分業体制に他ならないことを示している。したがって、人間社会における権力もこのような規則された分業体制と考えることもできるはずで、さらに脳や神経節の出現も、神経系全体の中での分業の特別な形態と考えることもできる。これらシステム全体の中で情報が動き、情報処理担体が動かず分業する過程に対し、貨幣の出現は、情報担体は分業せず運動する情報において特別な分業が現れる例となっている。貨幣の起源では、情報と情報担体の関係が逆になっている。すなわち、或る局所で生産され別の局所で消費される通常の情報に対し、貨幣のみは空間全体を絶えず動き消費されることがない。この意味で、経済活動においては授受される情報の側に分業が実現している。

そこで貨幣の起源に関する問題を参考に、中枢の出現をモデル化しようという企てがまとめられていく。この目論見にしたがって、貨幣論や貨幣生成モデルについて概説される。貨幣の起源に関するモデルでは、エージェントは商人であり、商品に対する各商人固有の欲望（欲しい商品の集合）、および交換するための商品の集合を持っている。これらは、想定される全商品のごく一部に過ぎない。商人は、他の商人と出会うとき、互いに相手の手持ちの商品の中に自分の欲しい商品が存在するとき（この条件は欲望の二重的一致と呼ばれる）、交換を実現する。このような物の交換の中から、常に商人集団全体の中を巡り続け、絶えず交換され続ける特定の商品は生まれるか、という問い合わせが貨幣の起源の問い合わせである。問題は、このままで欲望の二重的一致という条件を満たす状況がほとんど生起せず、交換が実行されないことだ。この条件はいかに弱められるのか、が貨幣論の問い合わせとなる。そのために市場性という大域的情報が導入される。多く商人が欲している商品のリスト、これが市場性である。市場性を知ることで、自分が欲していなくても、誰かが欲していればいつか交換でき、自分の欲しいものを手に入れられる。欲望、商品、市場性によって、貨幣のような特殊な属性を持つ商品の出現を説明するという機構が、ここで論じられる。

第2章は、作業能力交換エージェント集団のモデルで、ここで中枢の起源が数値計算を通して議論される。これらは主にロボット工学などで問題にされる状況である。様々な作業が用意されている。各エージェントは想定される作業の集合のうち、ごく少数の作業のみ実行できる作業能力を持つ。このとき問題と

氏名	西川 麻樹
して、或る作業の集合が与えられる。これらを効率よくこなすとき、問題が解けたと定義する。各エージェントは適宜協調して、集団全体で効率よく問題を解けるか、がシミュレーションによって評価されるべき問題となる。貨幣生成とのアナロジーを考えると、商人は、ロボット・エージェント、商品は、作業能力となる。ここでさらに商品交換とのアナロジーを拡張し、各エージェントは作業実行の欲求をもっていると考える。つまり各エージェントは作業能力と作業欲求を独立に有しており、欲求する作業能力を相手が所持しているとき、これを交換していく。この手続きは、商品交換のそれと同じである。したがって、欲望の二重の一致の困難もそのまま継承することになる。	
商品交換の場合、市場性で欲望の二重の一致の困難を克服したように、ここでは権威を導入し、それに依存した作業委託を導入する。或る権威条件を相手が満たしているとき、相手に自分の作業能力や作業欲求のコピーを与え、相手に作業を委託する。多くの委託を受け付ける商人は、動く商品リストということになる。この委託が本モデルの核である。委託も含め、能力交換が全商人で完了した段階で、商人集団は或る作業を課せられ、これを実行できたか否か評価される。この際、多くの委託を受け付けたエージェントは、多くの作業能力を持ち、様々な作業に対処することができる。この実効率の高さによって、より高い信頼性を獲得し、さらに多くの委託を受け付けることになる。ただし依頼者は、委託した相手が或る時間内に作業を実行してくれているか否かみており、できていないときには、委託した相手に罰を与えることになる。こうして「動く市場性」としての中枢は多くの場合集団の中で突然肥大する。他の全員がこれに委託し、監視し、罰を与えることで、これを維持するが、罰が集中すると、減衰し、消えることもある。ただし他の中枢がすぐさまあって変わる。多くの場合、多様な作業能力と作業欲求を有するただ一個のエージェントが長く維持され、中枢の起源という問題に対し一定の回答を与えたといえる。一つの中枢が出現すると、それ以外のエージェントは複数の作業能力をもたず、能力差の乖離は圧倒的なものとなる。ただし中枢の寿命の分布はべき分布となり、短命のものから長寿のものまであり、その寿命は平均値をもたない。信頼条件や罰を与える条件を変えることで、中枢の個数も変えることができる。記憶中枢に関して、脊椎動物の場合、脳のような唯ひとつの中軸が生成される。しかし、軟体動物のタコなどは、体の何箇所かに神経節を有し、これが脳の役割を担っている。つまり複数の中軸というものは現実に存在しており、モデルはそれを実現していると考えられる。	
第3章は、エージェント間相互作用を、一方のエージェントから他方のエージェントへの作業の流れを考えたモデルである。順序がつくるネットワーク構造に応じて集団全体の作業効率が変化し、効率の低い構造は淘汰される。このときハブのように、多くの辺を有する一個の節が形成されるか、という問い合わせが、ここで中枢の起源に関する問い合わせとなる。ここでも各エージェントは固有の作業能力および作業欲求を有しており、或るエージェントAの作業欲求と別のエージェントBの作業能力が一致するとき、AからBへの作業の流れが構築され、相互作用のパターンが決定される。エージェントがペアをつくり、情報交換し、相互作用のパターンを決める、エージェント集団の構造は、有向グラフとして決定される。この有向グラフの構造を使って、集団全体で与えられた仕事を実行する。その作業効率は、有向グラフの構造によって異なる。実際には、複数のエージェント集団を並列に用意し、各々有向グラフをつくり、仕事を同時に与えて作業効率の悪い集団は有向グラフを変える。これを繰り返し、すなわちいわゆる遺伝アルゴリズムによつて作業効率のよい相互作用構造を進化させるわけだ。	
与えられた仕事を対し、極めて効率の高いエージェント結合形式が、有限時間で出現する。このときシステムサイズが小さいときには、高い頻度で、多数の結合を有する単独のエージェント（ハブ）が出現する。システムサイズが大きいときには、ハブは出現せず、むしろ少数の枝を有する小規模のハブが多数出現し、それらが並列的に結合した、直線状の有向グラフをつくることが認められた。結合に制限を与える限り、大きな中枢より複数の中軸が出現することがわかった。	
第4章は結論である。貨幣モデルを改変し、作業能力、作業欲求を交換するエージェント集団モデルを構成することで、中枢の出現を説明した。また相互作用の形式を限定するとき、中枢の出現が妨げられることなどを述べている。	
本論文は、作業能力と欲求の交換に権威を導入することで集団中に中枢が発生することを説明したものであり、複雑系の科学や数理社会学について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって学位申請者の西川麻樹は、博士（理学）の学位を得る資格があるものと認める。	