

# 中枢化と分散処理のバランスと揺らぎ ：同一の問題の別表現としての脳と貨幣

Fluctuations between Centralization and Decentralization :  
Duality in Origins of Money and Brain

西川 麻樹 \*1 原 正彦\*2  
Asaki NISHIKAWA Masahiko HARA

独立行政法人理化学研究所 基幹研究所 揺律機能アジア連携研究チーム  
Flucto-Order Functions Asian Collaboration Team RIKEN Advanced Science Institute

In this article, we reported simulations for origins of a leader element in multi-agent systems. This simulation model could be regard as for origins of money with easy modifications. We added a novel dialog model concerning internal measurement into these. Effects of the modification in both model (of leadership and of money) was argued.

## 1. イントロダクション

「世界」の中で生きるためには、世界を創建しなければならない。またいかなる世界も、俗なる空間の同質的で、相対的な「混沌」の中からは生じえない。「中心」という固定点を発見すること、あるいはそれを投影することは、「世界の創造」に等しい

(『聖と俗』[ミルチャ 69])

(『貨幣の暴力』[アグリエッタ ミシェル 91, Aglietta 82] 第一章のエピグラフより)

複雑系の研究では、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 [Johnson 01][Brooks 86]。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。

しかし、現実の複雑なシステムの中には、制御を担う単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) 中枢部分に全体の縮図となるような情報が保持されていること、というような共通する特徴がみられる。こうした特徴は、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たとえば、[Mesarovic 70] は階層的構造を成すシステムに対する古典的研究だが、創発という観点は全くない。また、[Cheon 03] では  $N$  個の種が存在する Lotka-Volterra 方程式のシステムにおいてピラミッド状の構造を持った解が存在することを示している。しかし、垂直的な食物連鎖の存在を前提すること、モデルの特性上、量的関係のみで、中枢におけるシステムの状態の縮図の保持という観点が得られないこと、中枢による全体の制御という観点が入れられないことなどの点で、我々の論じようとする中枢とは異なる。上述の特徴 1) の観点では [Boccaro 07] や [Anghel 04] は社会的ネットワーク上でのリーダーシップのモデルである。しかし、[Boccaro 07] には創発という観点はなく、量的関係のみに焦点が当たっている点では両方とも [Cheon 03] と同様で、上述の特徴 2) が出てこない。

### 1.1 我々のモデル：中枢の起源の素朴モデル

ところで、ある種の脳のモデル [Kawato 97] 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

連絡先: 埼玉県和光市広沢 2-1 レーザ研究棟 研究室 4G

Phone: +81-48-462-1111 ext 4428

FAX: +81-48-462-4695

e-mail: asaki@riken.jp

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 [Kawato 97] の提出する脳のモデルの中にはある。

[Kawato 97] では、協調するモジュールの組み合わせは固定されていると暗黙に仮定されているが、ここでは、この交換 (協調) 関係が固定されておらず動的に変化するような状況を考える (たとえば [Dennett 93])。

そこでまず、エージェントは、他のエージェントに実行してもらいたい要求を持っているとする。また、エージェントは、(他のエージェントの要求に応じて) 自分が実行できる命令を持っている。そして、エージェントが自分の計算を行うために互いに互いの計算結果を必要とするような状況を、「命令の交換」としてモデル化する。

しかし、この状態でモデルを走らせると、命令の交換はほとんど実行されない。あるエージェント A が別のエージェント B の能力を必要としても、エージェント B の要求する能力を A がもっている確率は非常に低く、交換が成立しないからだ。この状況を「要求の二重の一致の困難」と呼ぶことにする。

そこで、以下のような変更を加える。

まず「権威」というパラメータを付け加える。A が命令実行者 (サーバー) で、B が依頼者 (クライアント) の時に、A が命令を実行しない場合に、エージェント A の B の中での権威は上昇するとする。これは、要するに A は B の要求に応えることができるが、逆に A の要求に B は応えられないという「片思い」の状況のときに、A の B にとっての権威が上がるということである。なお、ここでクライアントは、能動的に自分の要求に応えられる能力をエージェントを探す側、サーバーは、探される側という意味で用いている。

さらに、命令交換過程に以下のステップを組み込む。命令交換時にクライアント A のサーバー B の中での権威が閾値  $x$  以上のとき、クライアント A の命令をサーバー B は実行するが、サーバー B の要求は、その場では実行されずに、将来実行されることを期待してクライアント A に委任される。この場合、権威は委任した命令が将来実行されることへの期待を表現すると考えることも出来る。また、委任は、自分の機能を一時的に模倣 (キャッシュ) する操作と考えることも出来るだろう。

そして、委任された命令 (サスペンド命令と呼ぶ) は委任相手となったエージェントの内部で保留され、命令交換時に、エージェントは、自分が実行できる命令以外に、自分の内部に保留されたサスペンド命令を使って交換に応えることもできるとする (モデルの詳細については [Nishikawa 08] を参照のこと)。

上記モデルを実行すると、ある条件下で中枢と呼びうるような特異なエージェントが出現する。図 1 は  $N = 50, x = 10$  で

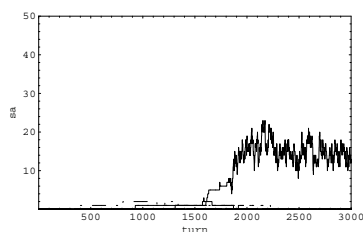


図 1:  $N = 50, x = 10$  で、横軸は時間、縦軸はあるエージェントの中にキャッシュされた能力の量。全てのエージェントの時系列を重ね描いた

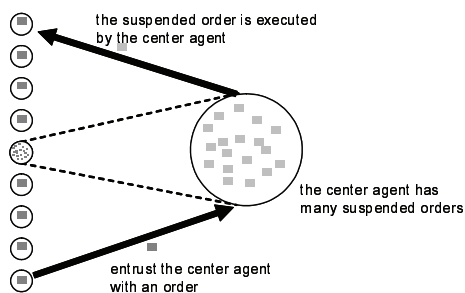


図 2: 中枢出現時の命令実行プロセスの概念図

モデルを実行した例である。

また  $x$  の大きさに対する依存を見てみると、 $N = 50$  のとき  $11 \leq x$  だと 20000 ターンほど経過しても中枢は出現しない。逆に、 $N$  に対して低い  $x$  だと複数の中枢が現れる場合がある。つまり単一の中枢を持つシステムの登場は素朴なモデルでは閾値  $x$  の範囲に非常に鋭く依存している。

中枢が創発した場合の命令実行プロセスは図 2 のようなものになり、システムを自己モニターする中枢が創発したという描像が得られる。すなわち、1) 各エージェントは自分の要求は権威のあるエージェントにとりあえず預けて、権威のあるエージェントの命令を実行するエージェントが増加する（服従の形成）。2) 権威のあるエージェントの内部には数多くの保留された命令が保持されるので、要求の二重の一致の困難を乗り越えて交換が成立する場合が多くなる（中枢のモニター機能の形成）。こうして、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描像が得られる。

## 1.2 中枢エージェントの効率とシステムサイズ

中枢の大きさを預けられた能力のサイズで表すと、それはほぼ  $N/4$  程度の大きさになる。これは  $N$  や  $x$  の設定とはあまり関係ないまた、図 3 を見ると、中枢出現のタイミングで命令実行数が増えることが分かる。つまり中枢の出現によって要求の二重の一致の困難が克服され、命令の交換と実行が行われるようになるのだ。

しかし実は、システムのサイズ  $N$  と無関係に命令実行数は一定になるため、システムサイズが大きくなると中枢の存在効果は減少してしまう。

では、システムサイズに比例して命令実行数を増やす方法はあるだろうか？ 命令実行数がシステムサイズに比例しない原因は、交換のクライアント側（自分の要求に応えられるエージェントを探す側）に中枢が選ばれる確率が他のエージェントと等しいため、 $1/N$  の確率でしか、中枢内にある能力が使われないことである。我々のモデルでは、エージェントが能力を使って交換を行うのは、エージェントがクライアント側として選択されたときだけなのだ。この点に関して改良を施したモデルについて後に触

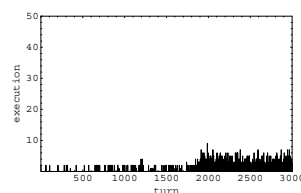


図 3: システムサイズ  $N$  と命令の各ターンごとの実行回数の時間発展。

れる。

## 2. 貨幣の起源のモデル

ここで提出したモデルは、実は全く別の問題に関するモデルを元にして作られている。それは [Yasutomi 95] による貨幣の起源のモデルである。貨幣の起源のモデルと我々の中枢のモデルは簡単な変更で移り合うことができる [Nishikawa 09b]。我々のモデルにおける権威は、そちらでは「市場性」と呼ばれ、自分にとって必要のない財をとりあえず将来のために受け取る可能性を意味する。Yasutomi のモデルにおける貨幣の創発とは、ほとんどだれも必要としていない財が交換のためだけに、全てのエージェントによって保有されるようになる事態である。

ところで貨幣の機能として教科書的にあげられるのは、価値の尺度、価値の蓄積、交換の媒介の三つである。Yasutomi のモデルはこのうち、交換の媒介物としての貨幣の生成のモデル化に成功したことは認めるべきだろう。

しかし、その際、価値の蓄積、価値の尺度という属性については、その存在を前提としてモデル化を行っている。価値の蓄積については、全ての財は消費されるまで永久に保存されるという暗黙の前提でモデル化されているし、また、価値の尺度については見えにくい形ではあるが、市場性という人気を測る共通の方法を導入することによって、やはり前提されている。つまり市場性 = 人気 = 交換価値を測る単位およびその交換方法については、貨幣の出現以前に全エージェントに共有されており、それを用いてエージェント間の市場性の意見交換が可能だということになっている。その状況は、本稿で素朴なモデルと呼んだ中枢のモデルにおいても同じである。

そこで、Yasutomi のモデルと比較可能な形式をできるだけ保ちつつ、価値の尺度の共有という前提を外したモデルを提出した [Nishikawa 09b]。

具体的には、Yasutomi のモデルにおける、

1. 市場性に関する意見交換
2. 市場性に対する正規化操作（市場性の合計値が全エージェント数で決まる定数を超えないようにする）

の 2 点を、極端にローカルな価値尺度のみを持つエージェントの視点からモデル化しなおすことで、価値の尺度が共有されていない状況をモデル化する。具体的には、1 に対しては、エージェントはそれぞれ他のエージェントから伝えられた記号としての「市場性の数値」を自分のみに通じる尺度で解釈し直し、それを再度相手に伝え、確認をとるが、その確認もまた記号として伝えられるためそれを再度確認し・・・という「終わりなき対話」を意見交換プロセスとする。また 2 に関しては、エージェントはシステムの実際のサイズを知らず、個人的な「今の自分に関係する範囲 = 相対的全体」を代わりに用いる、という方向でモデル化を行う。また 1 と 2 は相互に独立ではなく、意見交換は、相互の相対的全体についての意見交換と内容に関する意見交換の両方を行うという形でモデル化する。

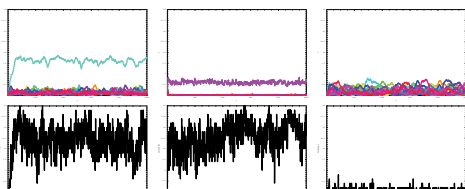


図 4: 上段は市場性の平均値の全財に関する重ね描きの時系列。下段は交換成立回数。横軸は時間。左二列は  $N = 20, x = 3$  (以下断りがない限りこの設定。また乱数のシードは全て同じ)。三列目は  $x = 5$ 。一列目は Yasutomi のモデル。二列目は本報告のモデル。一つだけ突出した市場性を持つ財が出現するとシンクロして交換成立回数が伸びている。これが無い場合、ほとんど交換は行われないのが三列目の閾値を少し高くした Yasutomi のモデルから分かる。なお Yasutomi のモデルに比べ本稿のモデルの市場性の絶対値が低いのは、エージェントごとの最大値の違いを反映している。

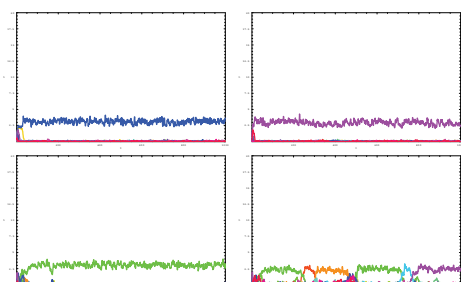


図 5: 閾値  $x$  への依存性。上段が  $x = 1, x = 6$  下段が  $x = 15, x = 19$ 。縦軸は市場性。閾値への依存はほとんど無い。しかし、ほぼ上限である  $x = 19$  では、貨幣財の生成と崩壊、交替が見られる。なお Yasutomi のモデルでは  $x = 4$  以下でないとき貨幣財の生成は起こらなかった。

また、Yasutomi のモデルにおいて貨幣の生成と崩壊は、ある時点においてうまく要求する財を手に入れることのできたエージェントを下位のエージェントと交換する簡易的な遺伝的アルゴリズムの導入によって達成される。言い換えればこの機構がない場合、一度成立した貨幣財は絶対に壊れない。実は、このとき、社会全体を覆い尽くすような情報網および単一の基準による淘汰という「市場性」に続く第二のグローバルな尺度が導入されているが、このモデルはこれを使わない。詳細は [Nishikawa 09b] を参照していただきたい (学会サイトよりダウンロード可能)。

図 4 は、市場性の平均値と交換成立回数の時系列である。一つだけ突出した市場性を持つ財が出現するとシンクロして交換成立回数が伸びているのが分かる。これが無い場合、ほとんど交換は行われないということも、閾値を少し高くした Yasutomi のモデルから分かる。条件を等しくした場合、両者において貨幣財の生成が起きている。この時点で「価値の尺度を前提としない貨幣の生成」は一応達成されたことになる。では、両者に違いはないのだろうか？

図 5 は本報告のモデルの閾値  $x$  への依存性を見るものである。見て分かるとおり閾値への依存はほとんど無いのが分かる。一方、Yasutomi のモデルでは  $x = 4$  以下でないとき貨幣財の生成は起こらない。一方、本報告のモデルでは、ほぼ上限である  $x = 19$  でも、貨幣財の生成と崩壊、交替が見られる。本稿のモデルは [Yasutomi 95] のようなグローバルな基準による価値評価は導入していないにも関わらず、生成崩壊が起きている例が観測できたことになる。もっとも、この例からは貨幣財の交替は、非常に特殊な閾値のみで起こるようにも思える。

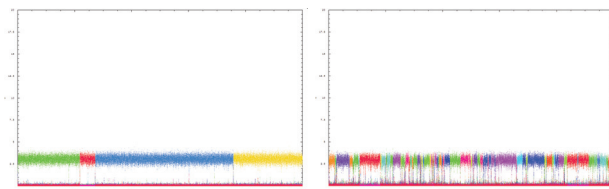


図 6: 100000 ターンの実行結果。左が  $x = 15$ 、右が  $x = 17$ 。閾値が厳しいと、貨幣財の交替までの寿命が短くなっている。

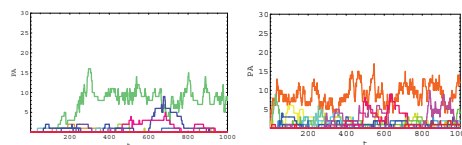


図 7: 左が元のモデル、右が基準の不定性を入れたもの。N は 30

図 6 は  $x = 15$  と  $x = 17$  の閾値を用いて 100000 ターン実行した結果である。図 5 では一見厳しい閾値以外では貨幣財は壊れないかのようにだが、閾値が厳しいと、貨幣財の交替までの寿命が短くなっているということが分かり、実は、 $x = 19$  のケースは特殊ケースではなく、タイムスケールが違うだけで、全ての閾値で同じダイナミクスを持っていることが推定される。

### 3. 再び中枢のモデルへ：基準の不定性と統一性を決定するものの位置

上の例は貨幣のモデルに基準の不定性のモデルを導入したものの結果だが、これを再び、中枢の素朴なモデルにそのまま入れることができる。その結果が図 7 である。元のモデルと違い、中枢成立後もサイズ的にも時間的にも小さなスケールの中枢もどきが数多く出現するようになるのがみられる。

先に触れたとおり、中枢のモデルには、システムのサイズが大きくなったときの中枢の機能不全という問題があった。これを解決するために、中枢が優先的に選択されるような枠組みを考えたのが、図 8 である。この図では二つの中枢を持つグループがあり、それぞれがお互いの中枢だと思えるエージェントを選び合うという方法で中枢が優先的に選択されるようにしたものの実行結果が示されている (詳しくは [Nishikawa 09a] 参照)。しかし、予想に反して、素朴なモデルにこのアルゴリズムを取り入れた結果は、相互のグループの中枢をお互いに破壊し合うという結果に終わってしまう。

一方、ここにさらに前述の基準の不定性を取り入れたものの

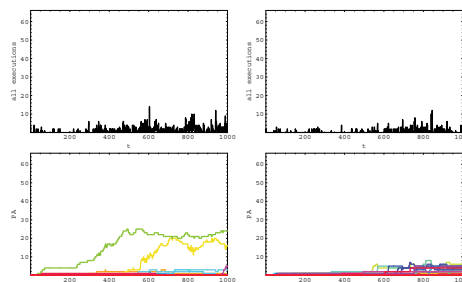


図 8: 相互選択をいれたもの。左と右のグループが相互に選択する。上から実行回数、内部能力の量

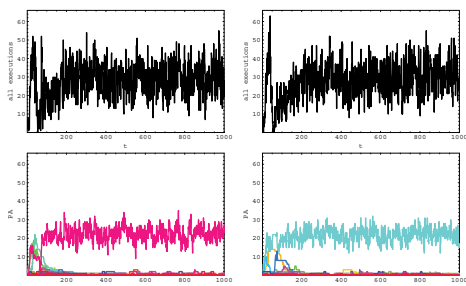


図 9: 図 8 と同じセッティングで基準に関する不定性を入れたものの

結果が、図 9 である。このバージョンでは、内部にある不定性がうまく働くことで、二つの中枢がちょうど良い頻度でお互いを選択し合い、結果として両方が非常に似通った状態を維持することで中枢の機能を  $N$  が大きくなってでも維持することに成功している。

#### 4. 結論

実は、あるシステムが統一性を持って動くように見えるときは、中枢もしくは貨幣が必要であるように思える。たとえそれが中心を持たない協調であるようにみえたとしても、そこには、その動作に「協調」という意味を外部から与える観測者が必要であり、その観測者は、対象となるシステムの縮図を内側に持つ。この場合は隠れた中枢が外側に存在している。一方、貨幣の場合は、中枢を必要としないが、それがシステムの内部にあまねく流通することで、システムの統一性を支えている。本稿のモデルは、そうした、「システムの統一性を認識するもの」が、システムの内部から創発してくる仕組みについての初歩的な洞察を与える。また、本稿での相互選択のモデルは、そうした内発的な観測者 = 中枢を持つシステムが、相互にお互いの統一性を支えているような状況を考えて。これは、たとえば中枢を持つものとしての人間がお互いに相手を「中枢を持つシステム」として認識し合うような状況だと考えればそれほど特殊な状況ではないだろう。本稿では、そうした状況下では、それぞれのシステムの内部に基準の不定性に伴う揺らぎが内在しないとお互いを破壊してしまうという結果が示されている。基準の不定性のモデルは内部観測 [Gunji 97] と呼ばれている方法論を元に行っているが、従来、このような状況下での効果を示した研究はなかった。その意味については今後の解釈にまかせたい。

#### 参考文献

- [Aglietta 82] Aglietta, M. and Orléan, A.: *La violence de la monnaie*, Presses Universitaires de France (1982)
- [Anghel 04] Anghel, M., Toroczkai, Z., Bassler, K. E., and Korniss, G.: Competition-Driven Network Dynamics: Emergence of a Scale-Free Leadership Structure and Collective Efficiency, *Physical Review Letters*, Vol. 92, No. 5, p. 58701 (2004)
- [Boccaro 07] Boccaro, N.: Models of Opinion Formation: Influence of Opinion Leaders, *arXiv:0704.1790v1 [nlin.AO]* (2007)
- [Brooks 86] Brooks, R.: A robust layered control system for a mobile robot, *Robotics and Automation*, *IEEE Journal of*, Vol. 2, No. 1, pp. 14–23 (1986)

- [Cheon 03] Cheon, T.: Evolutionary Stability of Ecological Hierarchy, *Physical Review Letters*, Vol. 90, No. 25, p. 258105 (2003)
- [Dennett 93] Dennett, D. C.: *Consciousness explained*, Penguin (1993)
- [Gunji 97] Gunji, Y. P., Ito, K., and Kusunoki, Y.: Formal model of internal measurement: Alternate changing between recursive definition and domain equation, *Physica D*, Vol. 110, No. 3, pp. 289–312 (1997)
- [Johnson 01] Johnson, S.: *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*, Scribner (2001)
- [Kawato 97] Kawato, M.: Bidirectional theory approach to consciousness, in *Cognition, Computation and Consciousness*, pp. 223–248, Oxford University Press (1997)
- [Mesarovic 70] Mesarovic, M. D., Macko, D., and Takahara, Y.: *Theory of hierarchical, multilevel, systems*, Academic Press New York (1970)
- [Nishikawa 08] Nishikawa, A.: The Emergence and Collapse of the Self Monitoring Center in Multi-agent Systems., in Nguyen, N. T., Jo, G., Howlett, R. J., and Jain, L. C. eds., *KES-AMSTA*, Vol. 4953 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 803–812, Springer (2008)
- [Nishikawa 09a] Nishikawa, A.: accepted, in *International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'09: July 13-16, 2009, USA)* (2009)
- [Nishikawa 09b] Nishikawa, A.: On the Origin of Money without a Unit of Measure, in *The 13th JAFEE Congress in Okayama "Coevolution and the Diversity of Evolutionary Path"*, <http://www.e.okayama-u.ac.jp/jafee/paper/c33.pdf> (2009), (In Japanese)
- [Yasutomi 95] Yasutomi, A.: The emergence and collapse of money, *Physica D*, Vol. 82, No. 1, pp. 180–194 (1995)
- [アグリエッタ ミシェル 91] アグリエッタ ミシェル アンドレ・オルレアン: 貨幣の暴力: 金融危機のレギュレーション・アプローチ, 法政大学出版局 (Aglietta, Michel and André Orléan [1982] *La Violence de La Monnaie*, Universitaires de France.) (1991)
- [ミルチャ 69] ミルチャ エリアーデ: 聖と俗 - 宗教的なものの本質について (叢書・ユニベルシタス), 法政大学出版局 (1969)