

ライプニッツのモナドを用いた 集団的知性のエージェントモデルの提案

上野ふき[†] 鈴木泰博^{††}

Collective Intelligence という概念は古くから論じられているが、その性質は未解明の部分が多い。本研究ではエージェントベースによる集団的知性の発生プロセスのモデル化の提案を行う。傾向として社会シミュレーションは自然現象のアナロジーを用いてモデル化するが多いが、本論文では“思想”も生命システムと同じ自然現象であると見なし、哲学者ライプニッツの思想を基にエージェントの構造と関係性を作成する。本モデルは、集団的知性の創発プロセスの中で、より正しい解に収束できる集団はどのような内部構造を持っているのかという事をシミュレートできるモデルの提案をする。

The Proposal of the Agent Model of Collective Intellect using Leibniz's Monade

Fuki Ueno[†] and Yasuhiro Suzuki^{††}

Although the concept of Collective Intelligence is discussed for many years, the character has many unsolved portions. In this research, modeling of the generation process of the collective intellect by an agent base is proposed. Although a social simulation is modeled in many cases, using the analogy of a natural phenomenon as a general trend, in this paper, it considers that "thought" is the same natural phenomenon as a life system, and it creates an agent's structure and relationship based on philosopher Leibniz's thought. The group who can converge this model on the righter solution in the emergence process of collective intellect proposes the model which can simulate what kind of internal structure it has.

1. はじめに

科学や技術、宗教や文化といった“人間”を特徴付けている営みとは、群生動物である人間が集団で蓄積してきた歴史的遺産であると考えられる。例えば20世紀以降、科学、技術は非常にめざましい発展を遂げてきたが、それはニュートンとアインシュタインのみの功績ではない。大小様々な発見とインタラクションの結果である。つまり、人間社会の発展を促している概念とは集団における“知”であると考えられる。

一般的に集団の知は個人知より優れていると判断されるが集団的ヒステリーに陥る例は少なくない上に、共有が進みすぎると全体の知能が低下する事も実験で明らかとなっている[1]。WWW上のサービスが普及し、世界的な規模で意見共有が行われ、Wikipediaのような巨大な知が発達し、グローバル化が進む昨今、人間とは何か、社会とは何か、思想とは何かと考える場合 Collective Intelligence の特性や形成過程を知る事は重要な課題である。

このような、集団社会の階層性等の特性、集団意識・知識の普遍的な流れや性質を数理的に捉える試みは社会システム科学で進められている。しかし人間関係には個人の心理など曖昧な問題が伴うため、数理的な扱いが困難であるとされている[2]。そこで近年試みられている方法がエージェントベースドシミュレーションによるボトムアップ型の研究である。具体的な研究例は出口[3]、Helbing[4]、中丸[5]の著作が詳しい。

確かにエージェントベースドシミュレーションは多くの可能性を持っているが、しかし、その方法や評価はまだ模索段階であると判断される[3]。中丸によれば、社会モデルやシミュレーションは、マイクロ-マクロリンク、相互補完性、予測可能性、新たな発見の可能性、ブラックボックスの解明等を行う点で有利であるが、どんなモデルでも作れてしまう上に、モデルの正当性を確認するためのシステムが確立していないため、それらを検証することが困難である[5]。

さらに、Collective Intelligence の性質だけでなく、シミュレーション結果を実際に教育等に役立てる事を目標とする場合、エージェントの内部ダイナミクスに重点を置いて Collective Intelligence 形成の特徴をとらえるモデルを作る必要がある。例えば、より良い“知”を形成する集団の持つエージェント内部とインタラクションの特徴を見

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

いだすことが望ましい。そして、日本社会や文化の性質を表現するモデルができれば理想的だろう。

しかし、Collective Intelligence という言葉は集団的知性、集団知、集合知、群衆の知恵など様々に訳されており、そして、マネージメント（経営学）、計算機科学やロボット工学、理論等、様々なところで使われている概念であり、その定義が曖昧である。それ故本論文では、最初に、1) Collective Intelligence の概念整理を行う。次に、2) 本論文の目的と哲学者ライプニッツを用いる理由を説明する。最後に、3) ライプニッツを応用した Collective Intelligence の創発プロセスのモデルの紹介とその可能性を論じる。

なお、本論文では混乱を避けるために、Collective Intelligence を統一的に「集団的知性」と呼ぶ。

2. 集団的知性について

集団的知性について述べる際、その理論と計算機科学分野での二つ発展を取り上げておく必要がある。

(1) 理論

集団的知性とは多様な人々を集めた集団の意見や決定が、個人もしくは少数の有能な人に優るといふ現象を捉えた用語である。この概念はアリストテレスの政治思想における総和理論 (Summierungsthese) にまでさかのぼる事ができる。しかし、計算機科学の発展とともに理論は、Douglas Hofstadter, Peter Russell, Tom Atlee, Pierre Lévy, Howard Bloom, Francis Heylighen, Douglas Engelbart, Cliff Joslyn, Ron Dembo, Gottfried Mayer-Kress らによって進化し、集団的知性は細菌、動物、人間、コンピュータなど様々な集団の意思決定の過程で発生するとされた。その中でも、集団的知性とは「一般に分散型知能」の形式であり、絶えず強化され、リアルタイムに調整され、そして技能を効率的に活用するという結果を生むという[6]、Lévy の行った定義がよく参照されている。

その定義を前提に、Henry Jenkins は集団的知性 (Collective Intelligence) と集合知 (The Wisdom of Crowds) を区別すべきだと主張している[7]。集団的知性は個々の人間が情報共有をして知見を修正しながら一つの意見をまとめて行くのに対し、集合知は個々の人間がお互いの影響を受ける事なく、自分の予測をした時そこに新しい知恵が生まれるという考え方である。現代においてネット上の情報、新聞、本、テレビ、他人との会話をせずに自らの意見を構築し発信する状態は考えられない。それ故、集団的知性をモデル化するにあたって、各エージェントが影響を及ぼし合いながら、集団的知性を形成して行く点を必ず考慮しなければならない。

(2) 計算機科学

計算機科学において、集団的知性の概念は「単純な個々が集団になって一つの有意義な (有意義であるかのように見える) 現象を表す」という点で重要である。「個々の集合から全体を」という考え方は、コンピュータの世界に新たなパラダイムを切り開いてきた。例えば、WWW の世界では Wikipedia, web2.0/3.0, (Facebook, mixi, twitter) が、また、人工生命では集団行動の特徴をシミュレートした Boids や Swarm Chemistry モデルが、工学の分野では単純なロボットを多数用いて知的な動作を可能にしようとする群ロボット等がよく知られている。

また、エージェントの協力、競争、交渉、調整、組織化などの集積的意思決定の計算モデルを構築し、複雑な現象を再現、予測し、また与えられた問題を解くことができるエージェントベース研究の多くを集団的知性や集合知のモデルと応用と捉える事ができる[8][9][10]。

M. C. Shuts は、マルチエージェント・システム、複雑適応系、群知能、そして自己組織化システムによって特徴付けられている既存のモデルを集団的知性 (CI) のモデルであると位置づける。そして体系的に各モデルのレビューを行い、CI システムを作る為にはどのようなモデルを選べばよいか、一目で分かるマップを示した[11]。

また、T. Szuba は測定が困難とされる集団的知性 (CI) の定式化と集団的知性指数 (IQS) の測定方法の提案している。測定方法は分子計算と準カオス計算を参考に、ランダム PROLOG プロセッサ (RPP) をツールとして統計に基づく評価で IQS を定めることができるとした。その数理モデルはバクテリアから人間までを含む“群れ”に見られる知的行動の IQS に対応できるとされる[12]。

3. 本論文の目的とライプニッツを用いる理由

(1) 目的

計算機科学における集団的知性に関する研究は「単純な個々が集団になって一つの有意義な (有意義であるかのように見える) 現象」の動態、特徴、ネットワークを外側から眺め、その関係性を明らかにすることに重点を置いている。特に、社会性昆虫の研究の結果生じたアルゴリズムをベースとして発展してきた。

それに対し、本研究では人間の相互作用によって情報が如何に流通し、形成されていくのか、その過程を考える事を目標とするため、内部構造を見るための新しいツールの開発を試みる。内部の特性を見るための手法としてはゲーム理論が発展しているが、主に勝ち負け (もしくは利益の増減) の勝負を主体としているため、集団の知識形成過程をモデル化するのに向いていない。

そこで、本論文では集団的知性の形成過程にはどのような構造をもったエージェン

トを作成すべきであるかという基本的な問題から開始する。具体的には、エージェントの内部構造と性質、エージェント間の関係のモデルを哲学者ライプニッツの思想を基に作成する。以下ではライプニッツを用いる理由を説明する。

(2) ライプニッツを応用する理由

計算機科学では、自然現象（アリ等の社会性昆虫、分子、DNA、進化計算）のモデル化を行い自然を理解するか、自然に学んで工学に応用する事が多い。社会シミュレーションの分野でも主にこれらの計算をツールとして用いている。

それに対し、思想は人間が内面の精神活動を行った結果として体系づけられた形而上のものであり、自然界と一線を画する。しかし、人間は自然の一部であると考えれば「思想も自然の一部である」と見なす事ができる。この見解から本研究では、“思想”を生物の生命システムと同じ自然現象の一例として自然科学的に捉える。

そこで、本研究で対象としたのが哲学者ライプニッツの思想である。ライプニッツは微分記号を考案した数学者として有名であるが、計算機科学に対する功績も大きい。例えば、パスカル型計算機の改良(乗算の自動計算のためのライプニッツ歯車の開発)、論理演算、二進法の研究等はその発展に寄与している。さらに、ライプニッツは 30 年戦争直後の荒廃したドイツで、あらゆる学問、国家、民族を統合しようと、巨大なネットワークの構築を目指していた[13]。百科全書計画、図書十進法の開発がその例である。

以上の事から、ライプニッツが集団的知性の重要性を説き、且つ巨大ネットワークを可能にする為のシステム開発に取り組んでいた事は自明である。

次に、彼の最も著名な哲学書『モノドロロジー』(1714 年) [14]は、モノド(単子)という形而上学的な最小の単位を設定して、世界や生命は如何様に存在しているのかを述べた存在論である。それ故、知や認識に特化した哲学ではないが、モノドは相互作用を通して内部構造が変化し、その構造の違いによってモノド間に支配関係が生じる。そして入れ子構造の集合が形成され、複合的な生物や物体が生成されるという多元的存在はマルチエージェント・システムによる記述方法と共通する部分が多く、計算モデル化の可能性を示唆している。

また、実存主義、構造主義、機能主義、実証主義など現代思想の要素をすべて含んでいると言われているため[15]、本研究では集団的知性(理論)とエージェントベース(手法)の近代的な原点をライプニッツに置き、彼の思想を基に集団的知性の創発プロセスのモデル化を検討する。

ライプニッツの思想をネットワーク科学に応用しようとした例は既にある[16]。彼らは静止したネットワークの解析をするだけでなくネットワークのダイナミクスを考察するべきであるとの観点からライプニッツのモノドロロジーを紹介してネットワーク解析に対する理論の応用を行う。1) ネットワーク構造のみを分析するのではなくて、

ネットワークを通してやり取りされている意味の流れを研究すべきである。2) 個々のノードを区別しそれらが持っている刺激(piquancy)、関係、経験、記憶、戦略をネットワークに取り入れるべきである。3) 人間と建造物が充実しているような人間以外の行為項と造られて機能する機械と行動の流れを規定し、調節している自然環境の関係のネットワークを調査する必要がある。しかし、この研究はネットワーク科学の問題点を指摘するにとどまり、新しいモデルの提案まで至っていない。

4. 『モノドロロジー』とモデル化

本章ではライプニッツの『モノドロロジー』を参考に、集団的知性モデルの枠組みを作成する。

4.1 エージェントの定義

形而上学的な最小の単位である一モノドを一エージェントとする。また、モノドとは非物質性、非延長性、不可分性があり、「複合的なもの」に含まれている「単純実体」であり部分がない。広がりも形もないため、空間的規定を受けない非物質的、非延長性のものであると定義づけられている。モノドは無機物から人間まですべてを表す用語であるが、本論文では集団的知性をモデル化するため、人間に限定した「情報のキャリア」と考える(エラー! 参照元が見つかりません。).

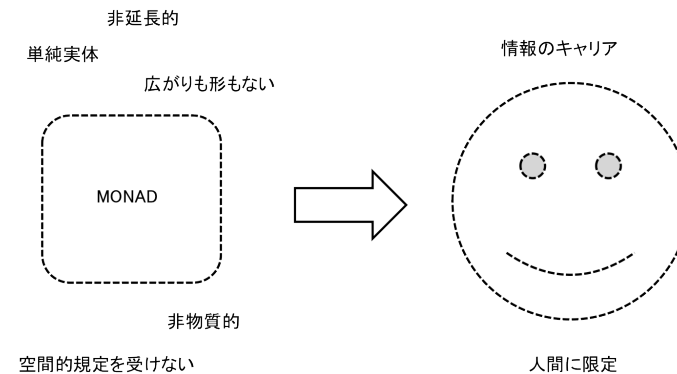


図 1 エージェントの定義

4.2 エージェント生成の定義

モノドは生ずるにせよ滅びるにせよ一挙になされ、複合されたものは一部ずつ生じ、

あるいは減びる。世界が生じたときに一挙に総てが創造される。これは世界に存在するモナドの総和が変化しない事を示す。ここには一種の「保存則」が働いている。本モデルはモナドを人間に限定して考えるため、この「モナド保存則」について考慮する必要はないが、出来る限りライプニッツのモデルに即して作成する事を目指すため、エージェント数を途中で増やしたり減したりしない事とする(エラー! 参照元が見つかりません。2)。

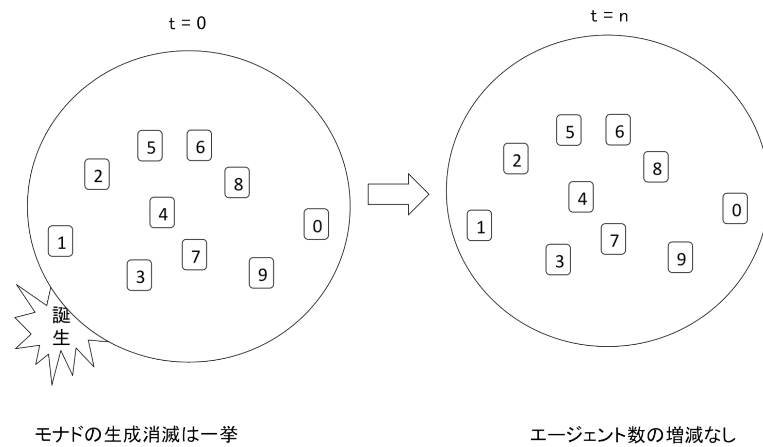


図 2 エージェント生成の定義

4.3 内部構造の定義

M モナドは性質を持ち、その性質は“表象”と呼ばれる。表象がそのモナドをそのものたらしめていおり、モナドはそれぞれ違った表象を持っていて同じものは一つとしてない。そのため、エージェント内部に記述されている情報をそのエージェントの性質や個性とする(エラー! 参照元が見つかりません。3)。

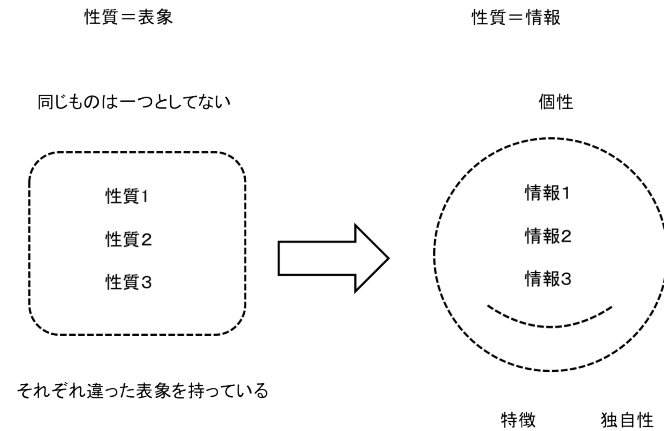


図 3 内部構造の定義

モナドの表象は変化し、その変化は欲求があるから起こるとされる。それ故、情報の追加、更新が行われなければならない(エラー! 参照元が見つかりません。4)。

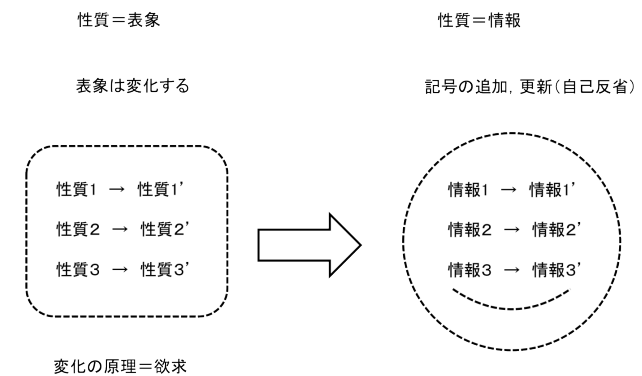


図 4 情報の追加, 更新

次に、その表象には意識されない表象(微少表象)と意識される表象(意識的表象)があり、その二つを区別しなければならない。特に、微少表象のように意識されない表象の存在または無意識の状態にあってもモナドはその表象作用を止めないことが、

意識の連続性を確保するのである事が重要となっている。モノドロジーによると、すべての“もの”は表象つまり、“情報”を持っており、それには段階がある。意識されない表象しか有していないモノドは動物でも人間でもない生物か物体である。次に記憶を伴うモノドは動物となり、理性的判断を伴うモノドは人間である。このように情報のレベル分けをすることによって、世界の“もの”を区別している。本モデルでは、意識されない表象（微小表象）を潜在意識とし、意識される表象（意識的表象）を顕在意識と解釈する。

さらに、本論文ではエージェント情報レベルの段階をより詳しく定義づけるために、『認識、真理、観念についての省察』（1684年）に従って、四層構造に設定し四段階の理解度を導入した。（図5）、（図6）、（図7）参照。

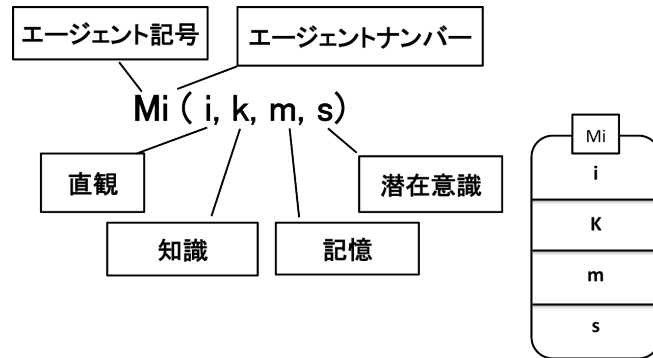


図5 四層構造のエージェント

『認識、真理、観念についての省察』に従えば、人間の認識は図6に見られるような4つの段階に分かれている。

一段階目：不明な認識とは以前見たはずの花をもう一度見ても、それが以前見た花と同一であるかどうか判断できない、もしくは他のものと違うということを識別できないような認識の事である。モデルではこの段階を「無意識」と呼ぶ。

二段階目：事象や物事をきちんと識別できる時の認識を明晰な認識とするが、その明晰な認識も二つに分かれる。明晰だが混雑な認識とは、「一つの事象を他の事象から識別するに十分な徴表を別に列挙することができない」場合であると説明されている。例として、香りや色があげられている。それは、盲目の人に赤を説明できない、また、自分しか知らない香りを言葉では確実に表現できないということが理由とされている。モデルではこの段階を「記憶」と解釈する。

三段階目：判明だが符号的な認識とは試金術師が金について持っているような概念であると述べられている。つまり、ある事象を数、大きさ、形の違いや希望、恐怖といった一般的に共通する概念でもって、他のあらゆる似たような事象から識別することができるだけの知識のようなものである。しかし、分析が多くなり事象の本性がすぐに認識できないとき、その事象の代わりに記号が用いられる。例として「正千角形」があげられている。たいていの場合「正千角形」を考えると、千の辺の図形をリアルに思い浮かべるのではなく「正千角形」という言葉を仮の観念として受け取る。モデルではこの段階を「知識」と解釈する。

四段階目：直観的な認識とは最も完全な認識であり、真の観念に通じ得る最高の道であるとしている。しかしライブニッツはこれを人間が認識できるかどうかかわからないと述べる。「その完全な例を人間が示し得るかどうか私は知らない。ただ、数の概念はそれに近いものだと言える」（L.E.C. I, S.23）モデルでは同じくこれを「直観」と呼ぶ。

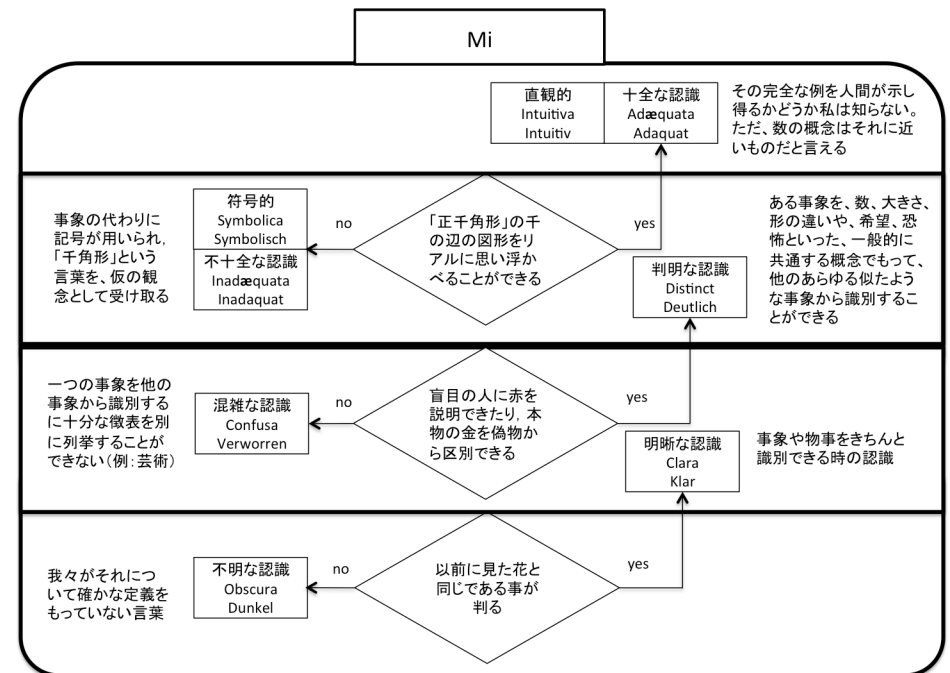


図6 『認識、真理、観念についての省察』の認識の段階

ドで社会系を表現する事に矛盾はない。そして、あるエージェントを中心に集まっている状態を「生」と考え、その集合が崩れ発散した状態を「死」と考える。集団、社会、グループ、会社の繁栄と衰退を表現する(エラー! 参照元が見つかりません。8)。

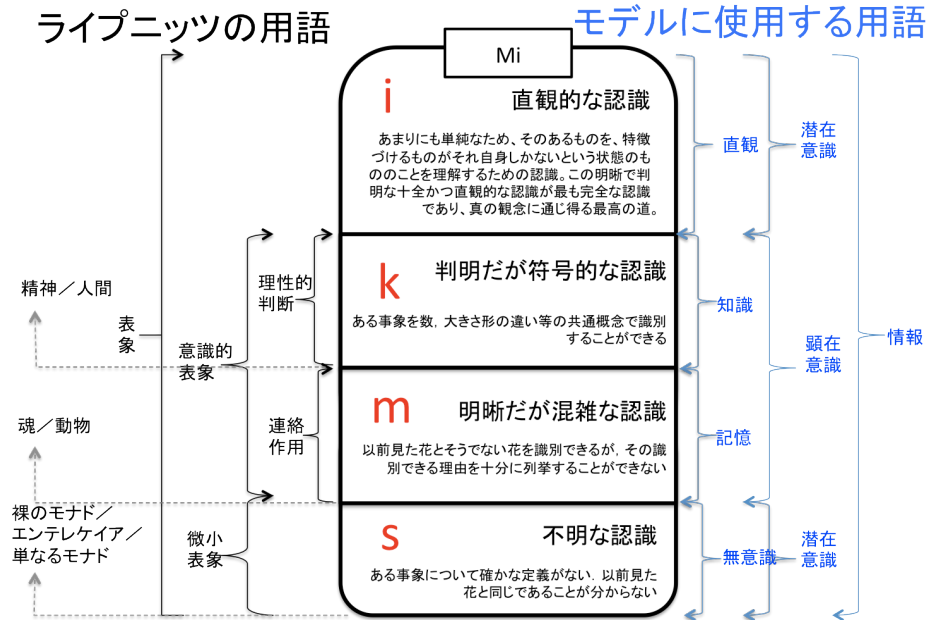


図 7 四段階の理解度を持ったエージェント内部

4.4 系全体の構造

生物の有機的な身体は分割可能であり、物体や生物は「複合的なもの」である。「われわれが発生と呼んでいるのは展開や増大のことであり、死と呼んでいるのは包蔵や減少のことである。まったく新しい発生も、厳密な意味での完全な死、つまり魂が分離するという意味での死もありえない」という説明から、生物はモナドの集合であると解釈する。モナドの集合体がヒト・モノを構成している。エージェントの自律的振る舞いによって集合体を形成する。

本研究では集団社会を一種の生命体としてとらえるため[17]、生物を構成するモナ

物体や生物は「複合的なもの」

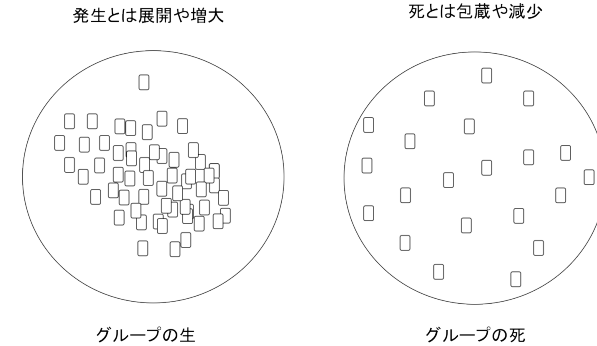


図 8 系全体の構造

4.5 入れ子構造

どの生物の身体もそれを支配(dominante)するエンテレケイアをもち、動物ではそれが魂である。ただ、この生物のどの肢体にも他の生物、植物、動物が充ちていて、そのそれぞれがまた、それを支配するエンテレケイアとか魂を持っているという説明から、いくつかのエージェントを中心として、大小複数の、入れ子構造状になった集合体が形成されることが分かる。ライプニッツは「すべての物体は川のように永遠の流動状態にあり、その諸部分は絶えずそこに入りたり出たりしている」と述べる。これは、「たとえば生物の新陳代謝」[18]のようなものであると注釈されている。

ある上位のモナドの元に下位のモナドが集合し、物体、生物を構成している。下位に集合しているモナド達は絶えず入れ替わる。しかし、最も上位のモナドがかわらない限り、その物体、生物の性質は保たれる。社会系でもアナロジーを取る事ができる。社会の場合、上位のモナドにあたるエージェントは首相、社長、監督といったグループを統括する人物と考えられる(エラー! 参照元が見つかりません。9)。

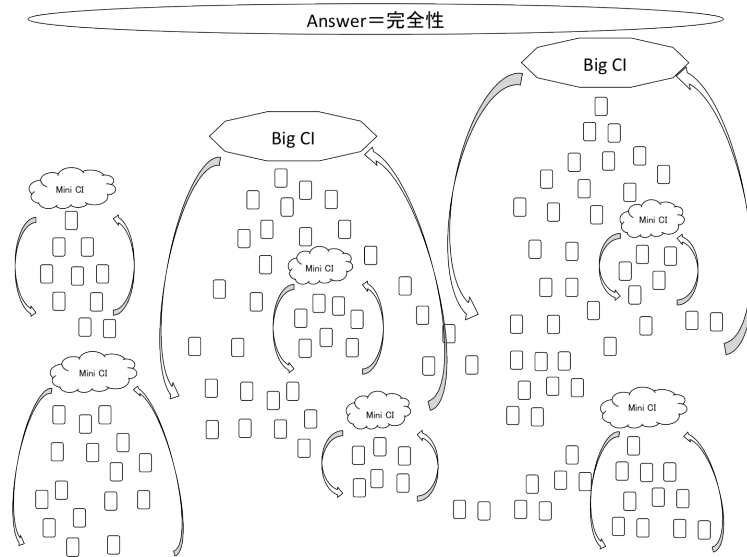


図 9 入れ子構造

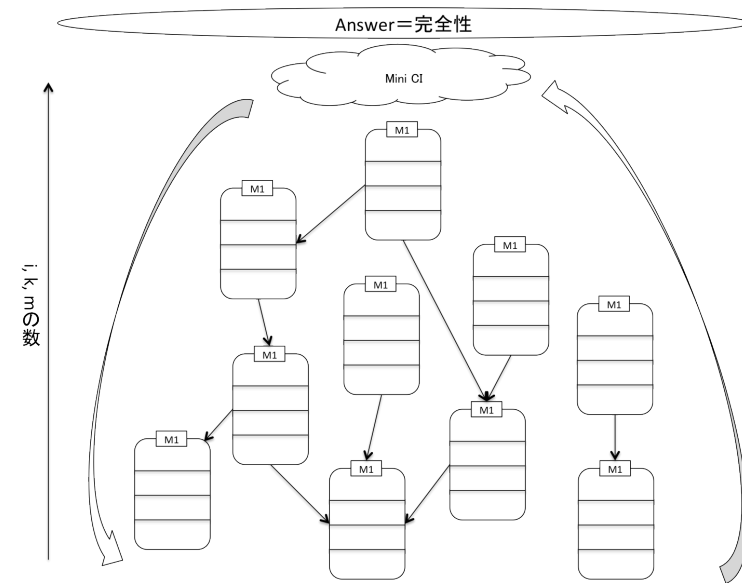


図 10 エージェントの優位性と連結構造

4.6 支配関係の定義

被造物は完全性を持っている限り外部に能動的に作用を及ぼす。不完全である限り他の被造物から受動的に作用を被る。モノダが判明な表象を持つ限りそれに能動的に作用を認め、混雑した表象を持つ限り受動作用を認めるという説明から、各々のエージェントは直観、知識、記憶、無意識の包含関係に従って支配-被支配を構成する。本モデルでは、その優位性を以下の様に定義する：

直観 > 知識 > 記憶 > 無意識

さらに、複合体は単合体と符合している。というのはすべてが充実しているのでどの物質も結びつき合っているし、どの物体もそれに接触しているものからの影響を受け、そのものに起こるすべてのことを何らかの仕方でも感知するばかりでなく、自分に直接接触している物体を介して、この物体に接触している別の物体のことを感じるという論から、全エージェントは連結構造にならなくてはならない。一つのモノダがあるモノダに影響を与えた場合、連鎖的にすべてのモノダに影響が伝わる(図 10)。

以上が『モノダロジー』から得られる、エージェントの構造と関係性のモデルの枠組みである。

5. 考察と課題

本モデルの特徴は、これまでモデル化される事が殆どなかった無意識や直観を取り入れている点である。教育機関で学んでいく“知”であれば記憶と知識の二つで表現できるかもしれないが、技術のように経験から非言語的なもので体得していく“知”は記憶と知識だけで説明することはできないだろう。

例えば、このモデルでは、知識を多く有しているにも関わらず、直観を有していないために他の相手に影響を与えることができず、集団的知性を形成できない事や、逆に、直観的には非常に優れた答えを持っているが、知識が乏しいため他の人に伝えられず、集団的知性を形成できない事という現象も表現することができる。つまり、どのような状態のグループがどういう答えを出して行くか、また、エージェント内部が

どのような状態になれば、より良い回答が得られるか等、集団的知性の形成過程を考察する事が可能である。この点で Kilduff, Hanke の三つの提案の内、1) ネットワークを通してやり取りされている意味の流れと、2) 粗野ではあるが、個々のノードを区別しそれらが持っている刺激 (piquancy), 関係, 経験, 記憶, 戦略を取り入れたモデルを作成することができた。

今後の課題は、本モデルを枠組みとして既存の様々な手法とツールを組み合わせ、エージェント内部の情報の流れや関係性をとらえる事のできるモデルを探索することである。

謝辞 本研究は、日本学術振興会特別研究員(DC1) (平成 22 年度~25 年度)の補助を受けた。

参考文献

- 1) Lorenz, J., Rauhut, H., Schweitzer, F., Helbing, D.: How social influence can undermine the wisdom of crowd effect, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 108, No. 20, pp. 9020–9025, (2011).
- 2) 下村政嗣, 山口智彦編: 自己組織化ハンドブック, エヌ・ティー・エス (2009).
- 3) 出口弘: エージェントベースの社会システム科学宣言—地球社会のリベラルアーツめざして, 勁草書房 (2009)
- 4) Helbing, D., Balmelli, S.: How to Do Agent-Based Simulations in the Future: From Modeling Social Mechanisms to Emergent Phenomena and Interactive Systems Design, Santa Fe Institute Working Papers (2011)
- 5) 中丸麻由子: 進化するシステム (シリーズ社会システム学), ミネルヴァ書房 (2011).
- 6) Lévy, P.: Collective Intelligence. Mankind's Emerging World in Cyberspace. Perseus (1999).
- 7) Henry Jenkins: http://henryjenkins.org/2006/11/collective_intelligence_vs_the.html
- 8) Smith, J. B., Collective Intelligence next term in Computer-Based Collaboration, Lawrence Erlbaum, London (1994)
- 9) Singh, V. K.: Agent-Based Computational Modeling of Emergent Collective Intelligence, ICCCI '09 Proceedings of the 1st International Conference on Computational Collective Intelligence, Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems, Volume 5796, pp. 240-251 (2009)
- 10) Lykourantzou, I., Vergados, D. J., Kapetanios, E., Loumos, V.: Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence, Vol 3, No 3, pp.217-226, (2011).
- 11) Schut, M. C.: On model design for simulation of collective intelligence, Information Sciences, vol. 180, pp. 132-155 (2010).
- 12) Szuba, T.: A formal definition of the phenomenon of collective intelligence and its IQ measure, Future Generation Computer Systems, vol. 17, pp. 489-500 (2001).
- 13) 佐々木力: 数学史入門, ちくま学芸文庫 (2005).

- 14) Leibniz, G. W.: Monadologie und andere metaphysische Schriften, Felix Meiner (2002)
- 15) 森毅: 魔術から数学へ, 講談社学術文庫 (1991).
- 16) Kilduff, M., Hanke, R.: Networks in transition: A Leibnizian perspective, Academy of Management Meeting, August, (2002).
- 17) ハイエク: 市場・知識・自由——自由主義の経済思想, ミネルヴァ書房 (1986).
- 18) 西谷裕作: ライブニッツ著作集 (9), 工作舎 (1989).