

# エージェントベースモデリングの認識論

出口 弘

本稿では、エージェントベースのモデリング&シミュレーションに関する認識論的課題を扱う。そこでは方法論的なモデルの展開（Unfolding）と畳込み（Folding）という概念を鍵に、エージェントベースのモデル作法について論じる。従来のマクロな微分方程式モデルを中心としたモデル化技法は、マクロな変数の増減を定める動的プロセスを定式化するものである。しかしそのマクロ変数がマイクロなエージェントの状態変数から得られるシステムでは、個々のエージェントの状態変数からなるモデルへとモデルを展開することで、より微細な境界条件をモデルに組むことが可能となる。本稿ではこうした異なる粒度や視点を持ったモデル間の相互関係をモデル化の認識論として分析する。

キーワード：エージェントベースモデリング、社会シミュレーション、モデルの展開（Unfolding）、モデルの畳込み（Folding）

## 1. モデル間関係とモデル構築・再構築の方法論

本稿では、エージェントベースのモデリングとシミュレーションに関する認識論的課題を扱う。この種の課題に関する認識関心は世界的に高まっており、この数年幾つもの国際会議が企画されている。今年の4月にもピッツバーグ大学でモデリングとシミュレーションの認識論という国際会議がピッツバーグ大学の哲学科のホストで行われた<sup>1</sup>。

ここでは、モデル間関係を方法論的に扱うために、従来の還元や実現概念等の諸概念に換えて、モデルのUnfolding（展開）およびFolding（畳込み）という概念を導入する。またこれについて簡単な形式的な扱いを導入し、それにより従来のマクロ・ミクロのモデル間の関係を明確化する。そこではミクロなプロセスへの還元や、マクロな関係式へのアグリゲーション、あるいは機能的な関係式のマイクロなプロセスによる実現など従来広く論じられてきた方法論上の課題とアクションリサーチや構築主義で課題とされる主体による「理解」のプロセスを内部モデルの構築に関するUnfoldingとして方法論的に同一俎上に載せて議論することを試みる。

そのためにまず従来のモデル間関係の議論を少し整理しよう。ここでモデルというのは主には、何らかの対象領域の説明のために作成され、数理的あるいは形式的に記述された理論のことをいう。モデルで用いら

れる変数や定数は一定の領域で解釈され、当該領域についての知の解釈を構成することとなる。このようなモデルには幅広いクラスのものが含まれる。古典的な常微分方程式やそれに空間項を付け加えた偏微分方程式で記述されるモデル等が代表例である。これらに加え確率微分方程式、確率過程等の動学、ゲーム理論や線形連立方程式もしばしば用いられる。ただしこれらはモデルに用いられる言語としての数理の名称であり、モデルそのものではない。モデルはある領域の現象を説明するために用いられ、例えば感染症の説明に用いるSIRモデルや生態系の説明に用いるロトカ・ヴォルテラモデル、あるいは囚人のジレンマゲーム、進化ゲームのようにある対象領域に解釈を持つ。ただしその解釈は、現象そのものというよりもある種の理念型として当該の数理を解釈可能なモデル構造の中で充足することを意味する。数学基礎論の含意では理論を解釈する構造のことをモデルと呼ぶ。このあたり常に混乱を招くところであるが、前者は理論モデル、後者は構造あるいは構造モデルと呼び区別する。我々が通常、モデルと呼ぶのはこの両者、形式的な演繹体系を持った数理体系とそれを解釈する集合論的な構造を併せてのことであると考える。したがって現象をモデルを用いて解釈するためには、さらに観察や測定から構築される構造化されたデータが、理論で充足される必要がある。このようなモデル觀は、領域固有なモデルを越えて、異なる領域に解釈が可能なモデルという概念を導く。一般システム協会が当初強調していた理論問

でぐち ひろし  
東京工業大学 総合理工学研究科  
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259

<sup>1</sup> この国際会議には日本人は筆者を含めて3人参加し、発表は筆者一人であった。<http://www.modelingepistemology.pitt.edu/>

の共通構造としてのモデル観がこれである<sup>2</sup>。このようなとおりあえず現象からは独立で、しかし数学そのものではなく一定のモデルとしての解釈を伴う理論は、例えば集中定数系や分布定数系のように数理と領域固有のモデルの狭間で広く用いられてきた。工学的モデルの多くは、このように数理そのものではないが、幅広い現象に適用可能なモデル概念として広く用いられる。さらに社会科学でも線形モデルを計量モデルとして用いることが広く行われてきた。このようなモデル概念は、数理言語による数理モデルだけに限定する必要はない。社会科学では自然言語を用いたモデルが広範に用いられてきた。そこでは概念モデルが自然言語で記述され、モデルの解釈も主体による解釈的な方法が用いられる。このような概念的なモデルと数理的なモデルは必ずしも乖離したものではない。アクションリサーチの領域やソフト OR の領域では、モデルを実際の対象領域に適用するプロセスそのものをも分析の対象とする。これは主体を含む複雑系一般で極めて重要なモデル作法でもある。例えば内部モデルは主体を含むシステムの分析で、主体が当該のシステム内部での意思決定のために依拠しているモデルを表す概念である。内部モデルを含むモデルを適切に記述することは、内部にモデルを含むモデルを記述するという、難易度の高い課題を含んでいる。

このように異なった領域のモデルを接合させること、あるいはモデル構築のプロセスや解釈のプロセスそのものをモデル化することもまた方法論を含むモデル分析の領域で広く行われてきたところである。このようなモデル間関係や多彩なモデル記述言語による異なった視点からのモデルを接合したモデル構築という課題は、それ自体モデルのメタ分析であるが、そのメタ分析をモデル化のプロセスに組込み、モデル構築とその利用のプロセスをより豊穣なものにしようとする試みは、システム科学の初期からさまざまに行われてきた。これはまた理論間関係やシステムの合成分解の問題として、それ自体数理分析や論理分析の対象でもある。

本稿で我々は、社会や組織に対してエージェントベースモデリングとそのシミュレーションという新しいモデル記述言語が導入されるという前提で、このメタ理論的な課題に対してモデル間関係の分析を行う。ここでいうエージェントベースモデリングとそのシミュ

<sup>2</sup> <<http://isss.org/world/en/about-the-isss>> に 1956 年に一般システム協会が設立されたときの趣意が掲げられている。

レーションは個人や組織等の自律的エージェントを基軸としたモデル構築と、その動的プロセスの記述と計算をいう[2][6][13]。すなわちエージェントベースのモデリングでは、モデルはマイクロに主体を要素として構築される必要がある。ただしそこでは主体の集まりとしてのマクロな組織や社会の変数も、何らかのエージェントの属性のアグリゲートされた変数や、エージェントの活動の参照情報として不可欠であり、その意味でエージェントベースモデリングは必然的にミクロ・マクロリンクを含むモデリング技法となる。したがって最低でもミクロなエージェントを基軸としたモデルが、マクロな社会や組織のモデルとどのような関係にあるかを知ることが重要となる。そこでは、まずマイクロなモデルで用いられる主体の状態変数と、マクロな記述で用いられる状態変数間の関係に十分な注意が払われる必要がある。

我々は社会の中の人間等の自律的主体の活動に関する諸理論間の関係を、マクロなモデルや粒度の粗いモデルから、エージェントベースのモデルを構築するプロセスと、その逆にエージェントベースの粒度の細かいモデルを、より荒い情報の縮減されたモデルへとアグリゲートするプロセスに大別して考える。ここではこれをマクロモデルの Unfolding (展開) とマイクロモデルの Folding (畳込み) と取りあえず呼ぶ。本稿での我々の目的はこの、Unfolding (展開) と Folding (畳込み) と呼ぶ、理論間関係の方法論を、エージェントベースモデリングのモデル化作法に組込むことである。このようなモデリングサイクルそのもののモデル化の作業への組込みは、認識論的アプローチとしては、クワインが自然化された認識論で試みたものであり、社会科学ではチェックランドによるソフトシステム方法論の試みや、ルーマンによる社会化された認識論の企てがある[3][10][12]。ここではそれをミクロとマクロ等、モデル化への認識関心の差異の諸アスペクトによって策定された、同一の志向対象に対する異なる視点からのモデルが互いにどのように接合し、どのように拡張あるいは限定され、あるいはどのように主体の対象理解や問題解決に用いられるか等を、Unfolding (展開) と Folding (畳込み) という方法論的概念を導入することで読み解いていきたい。

我々は以下の五つのモデル間の展開関係を区別する。  
1) マクロモデルのマイクロ展開とマイクロモデルのマクロ畳込み、2) マルチアスペクト展開、3) エージェントベースモデルへの内部モデルの導入、4) 机上

演習等でのモデルの外部モデル展開, 5) 機能要件の実現問題としての展開. これらのモデル間の展開関係は, いずれも主体を含む複雑系のモデリングでは不可欠の認識関心を表すものとなっている. 本稿では紙幅の関係で最も基本となる微分方程式で記述されるモデルのマイクロ Unfolding のみを扱う.

## 2. マクロ変数のエージェント展開 (Unfolding) と畳込み (Folding) の三類型

エージェントベースモデリングは, 何らかの主体性を持った要素からなる複雑なシステムに対するモデリングの手法である. エージェントベースシミュレーションはその動的変化を計算する方法である. エージェントベースのシミュレーションでは, そこで用いられるエージェントの状態変数に対する時間発展作用素の構造は, 常微分方程式が対象としていた連続的な状態変数 (ストック変数) の変化をその変異量 (フロー変数) から求める方法とは明らかに異なる手法が求められる. 連立の常微分方程式 (あるいはそれに空間項の付け加わった偏微分方程式) で記述されるシステムの変数は, 基本的に連続的な状態変数であり, 単位時間当たりのその変異 (フロー変数) を計算することで, 次の時点の状態が求められる.

$$S(t + \Delta t) = S(t) + \Delta S(t), \Delta S(t) = \Delta S [\text{In Flow}] - \Delta S [\text{Out Flow}] \text{あるいは,}$$

$$dS(t) = F(S(t), a) dt \text{のように記述される.}$$

従来, 散逸構造やシナジエティクスなどで複雑系として解析されてきた力学系は, 状態変数が多次元でかつその変異 (フロー) への影響が非線形となるようなシステムであった. このような方程式を単に安定性解析をするのではなく, その構造パラメータの変異に対する構造安定性や, 大域的な軌道の分岐を論じるのが力学系としての複雑系の扱いであった.

しかしこのような力学系の解析方法は, エージェントベースのモデリングでは限界がある. それはマイクロなエージェントベースの動的プロセスとマクロな系の動的プロセスの関係を見る中で明らかとなる. 本稿では3つの代表的と思われる, エージェントの動的プロセスとマクロな状態変数の動的プロセスを比較することでまずその問題を明らかにする. そのために基本となるマクロ微分方程式の Unfolding を論じる.

エージェントベースモデリングによるマクロ微分方程式のマイクロ Unfolding は, 雜駁にいえば力学系の微分方程式を差分方程式系で近似し,  $\Delta t$  の間に,

個々のエージェントの属性変更がどのように行われているかを明らかにすることである. そのためには, どのようにマクロ微分方程式の変数がマイクロなエージェントの集合から構成されているかを最初に示す必要がある. 次にエージェントの集合から, 当該のマクロモデルで用いられている変数がどのように構成されているかを明らかにする. これによりマクロ方程式がどのようなマイクロな起源を持つかが明らかになる. またマイクロな動学を基点にそこからマクロな関係式を導く Folding の視点から見たときに, マイクロなプロセスに対する特定の極めて簡略な境界条件だけが, 出発点となつたマクロな方程式を導くことも明らかになる.

マクロな微分方程式の理念型としてすでによく知られている区分に, 集中定数系, 分布定数系の区別がある. また分布定数系の離散化モデルに格子力学系がある. さらに集中定数系に一様ではないトポジカルな結合を入れたものに, カチャルスキ等による回路網熱力学がある[11]. これらのシステム記述は, いずれもストックフロー型でのマクロ変数間の関係についてより詳細化された結合の境界条件を考慮した動的システムモデルとなっている.

しかしながらマイクロな動学で考慮されるべき多くの境界条件はマクロに Folding した変数のダイナミクスでは記述できないことが多い, それゆえマクロ方程式は, マイクロな視点からみたとき極めて特殊な境界条件を扱うモデルと見なされる. これは統計力学的な気体の分子運動の方程式が, エルゴード性を満たす条件下で中心極限定理でマクロな熱力学を導くのと同様の関係であるといつてよい. しかし物理学の方程式と異なりマイクロなプロセスに多くの社会的相互作用が関係するのが社会シミュレーションにおけるエージェントベースのモデリングであり, そこに還元すべき普遍法則を見いだすのは原理的に困難である.

我々はここでさまざまな微分方程式系を, そのエージェント展開系へと展開 (Unfold) することで, より詳細なモデル概念が導入可能なことを示し, エージェントベースモデリングが既存の微分方程式型のモデルとどのような関係があるかを明らかにしたい. またモデリング手法を数理的に基礎付けるためにも, マクロ変数をエージェント変数に展開する, エージェント展開型としての確率的動学プロセスのモデル記述の作法を明らかにする.

ここでは 1) エージェントの離散状態遷移 (State

Transition) のダイナミクス, 2) エージェントのストック・フローのダイナミクス, 3) エージェントの代替案選択のダイナミクスの三つのマイクロプロセスのタイプを区分し, その各々についてどのように Unfolding が可能となるかを明らかにする.

## 2.1 エージェントの状態遷移のダイナミクス.

マクロの微分方程式モデルとマイクロな状態変数の関係は, マイクロな状態変数がそのままマクロなストック・フローにアグリゲートされ直結するのではなく, ある離散状態を取るエージェントの人口あるいは(正規化された) 人口比率の動学の形でマクロモデルが示される場合が多い. 感染プロセスの SIR モデル, 生態系のロトカ・ヴォルテラモデル等, エージェントの何らかの活動に基盤を置く, 多くの現象論的マクロモデルがこの範疇のマクロモデルに Unfolding される.

そこで感染に関する SIR モデルを事例として問題を明らかにしよう. 感染症のモデルとしてしばしば用いられる SIR モデルは, マクロな  $S(t)$ : 未感染者,  $I(t)$ : 感染者,  $R(t)$ : 除去者を示す 3 変数の動的変化を記述する下記のような微分方程式となっている[9]. ただし,  $S(t) + I(t) + R(t) = N$  (総人口) なので, 本質的には 2 変数力学系となる.

$$\begin{aligned} dS(t)/dt &= -\beta \times S(t) \times I(t) \\ dI(t)/dt &= \beta \times S(t) \times I(t) - \delta \times I(t) \\ dR(t)/dt &= \delta \times I(t) \end{aligned}$$

この SIR モデルは感染症に関する典型的な集中定数系のマクロ微分方程式である. この SIR モデルに対して単純なエージェントベースのマクロ展開系は, 次のように与えられる. 個々のエージェントは 3 状態,  $\{s, i, r\}$  のいずれかの状態を持つものとする. すなわち,  $s$  で未感染状態,  $i$  で感染状態,  $r$  で死亡あるいは回復状態という個々のエージェントの状態を示す. マイクロには, この  $s$  から  $i$  への状態遷移が感染を,  $i$  から  $r$  への遷移が回復あるいは死亡への遷移に対応する. この離散状態からマクロなストック変数は次のようにして求められる.

$$S(t) = |\Omega[s; t]| = |\{\omega | \omega \in \Omega \text{ & State } (\omega) = s\}|$$

$$I(t) = |\Omega[i; t]| = |\{\omega | \omega \in \Omega \text{ & State } (\omega) = i\}|$$

$$R(t) = |\Omega[r; t]| = |\{\omega | \omega \in \Omega \text{ & State } (\omega) = r\}|$$

$S, I, R$  のマクロ変数は, それぞれの属性を持つエージェントの数を示す.

ここで,  $P[s, i; t](\omega)$ ,  $P[i, r; t](\omega)$  を時刻  $t$  での個々のエージェント  $\omega$  の  $s$  から  $i$ ,  $i$  から  $r$  への状態遷移確率をそれぞれ示すとする.  $P[s, i;$

$t](\omega) = \beta \times I(t)$ ,  $P[i, r; t](\omega) = \delta$  と一様であれば,  $\Delta I(t) = |\sum \{P[s, i; t](\omega) | \omega \in \Omega[s; t]\}| - |\sum \{P[i, r; t](\omega) | \omega \in \Omega[i; t]\}| = S(t) \times \beta \times I(t) - I(t) \times \delta$ ,  $\Delta I(t) = S(t) \times \beta \times I(t) - \delta \times I(t)$  となり SIR と同じ力学系  $dI(t)/dt = \beta \times S(t) \times I(t) - \delta \times I(t)$  を導く. ここで  $\beta$  は感染率,  $\delta$  は除去率と見なされる. この定式化は, SIR モデルのマクロ展開とその逆プロセスとしてのマクロ畳込みを与えてくれる. この単純な展開は, 通常のマクロ方程式の導き方とは異なり, エージェントの離散状態遷移のプロセスを陽に記述している. それゆえマクロなモデルの持つ限界が, マイクロなプロセスとして何を意味しているかを示すことができる.

このモデルでは, 人口が多いと感染者総数が限りなく全人口に近くなる可能性がある. これはマイクロに,  $P[s, i; t](\omega) = \beta \times I(t)$  という確率過程が, その時点での患者数に未感染のエージェントが比例して影響を受けるという, 患者と未感染者のランダムで一様な接触構造を想定した結果である. これは現実の社会構造を考えたとき, かなり無理のある仮定であることは容易に分かる. それではこれを既存のマクロモデルの中で拡張しようとするとどうなるだろうか. 方法はいくつかある. 偏微分方程式や格子力学系の考え方で空間項を入れるあるいはその離散型としてパーコレーションモデル的な拡張を行う可能性がある. さらにネットワーク型に領域分割した結合モデルを構築するなどの拡張も試みられる. これらは従来知られている力学系の理念型として, 集中定数系(常微分方程式), 分布定数系(偏微分方程式), 格子力学系, 回路網力学系などの考え方の延長線上にあるモデル策定となる. それらの拡張法ではより詳細な境界条件を持つマクロプロセスを近似するには限界がある. これに対して, マイクロ展開したモデル上では, このマクロ上での問題設定より遙かに詳細でかつリアルな境界条件の設定が可能となる. 例えば感染のプロセスをさまざまな場(施設等: 以下スポットと呼ぶ)ごとの人間活動のレベルで捉えることで, さまざまな場での組織的対策介入レベルに整合する水準の構造モデルを構築し, それに基づいた感染対策の分析を行うことが可能となる. 我々はこれを我々の開発したエージェントベースモーリングのためのシミュレーション言語 SOARS 上で, 天然痘やインフルエンザ等の感染症疫学のシミュレーションモデルとして構築してきた. SOARS によるエージェントベースシミュレーションで行われている疫学のモデル化では都市構造や, 家族構造, 人口構成,

それらに基づく都市での人間の活動モデル等を導入することで、詳細なモデル展開が行われて、それに基づいて感染プロセスがモデル化されている[8]。

ここではその概要をシミュレーションモデルを簡略化した集合論的モデルで示す。

$S(t)$ : 未感染者数,  $I(t)$ : 感染者数,  $R(t)$ : 除去者数  
 $\Omega$ : エージェントの集合 =  $\Omega[s; t] \cup \Omega[i; t] \cup \Omega[r; t]$ ,  
 $\Omega[s; t]$ : 未感染者の集合,  $\Omega[i; t]$ : 感染者の集合,  
 $\Omega[r; t]$ : 隔離者 : 回復者 : 死亡者の集合

SpotSet: スポット (局所的な場所) の集合: 例 SpotSet = {家 1, 家 2, ..., 学校 1, 学校 2, ..., 職場 1, 職場 2, ..., 病院}

$\rho(\text{SpotSet})$ : スポットの集合のパワーセット: 例 {家 1, 学校 2}  $\in \rho(\text{SpotSet})$

ActSpot:  $\Omega \rightarrow \rho(\text{SpotSet})$ : エージェントに自分の関連するスポットを割り当てる関数: 例 ActSpot( $\omega_1$ ) = {家 1, 職場 2}

ActSpot( $\omega$ ) は  $\omega$  の活動しているスポットの集合で  $\omega$  の行動圏を示す。

$$\Delta I(t) = |\sum\{P[s, i; t](\omega) | \omega \in \Omega[s; t]\}| - |\sum\{P[i, r; t](\omega) | \omega \in \Omega[i; t]\}|$$

未感染者  $\omega$  と接触する可能性のある感染者数 Inf-Agent( $\omega$ ) を次のように定義する。

$$\text{InfAgent}(\omega) = |\{\nu | \text{ActSpot}(\nu) \cap \text{ActSpot}(\omega) \neq \emptyset, \nu \in \Omega[i](t)\}|$$

未感染エージェント  $\omega$  が、感染する遷移確率は、単純化すると例えば次のように与えられる。

$$P[s, i; t](\omega) = \beta \times \text{InfAgent}(\omega) \text{ for } \omega \in \Omega[s]$$

ここで感染者が未感染者と接触する頻度は、それぞれの行動圏の重なり合いに依存する。この  $\omega$  と接触する可能性のある患者数は SIR マクロモデルでの変数である  $I(t)$  よりずっと小さいものとなる。具体的には都市構造やその上での活動モデルを具体的に定式化することで、詳細展開が具体的に行われる。なお実際のシミュレーションモデルでは、エージェントが学校や職場、家庭等の場 (スポット) を移動することで、そこでの汚染度や感染のリスクが求められることや、滞在時間に依存した感染確率の変化などより詳細な構造化が行われている。さらに各々のスポットでどのような感染対策がなされているかによってもこの感染確率は変化する。

このように、マクロなモデルをマイクロに展開することで、エージェントベースの動的システムを、一方

で限定した条件下で既存のストック・フローの力学系と結びつけると同時に、そこからより詳細な構造化を行い、 $P[s, i; t](\omega)$  や  $P[i, r; t](\omega)$  を定めることで(確率的な) 動的システムとしてのモデルの定式化の頑健性を保ちつつ、それをシミュレーションで解くというのがエージェントベースの動的システム分析の一つの標準手法となる。

しかしそこではエージェントの状態遷移が離散状態間の遷移であり、その遷移の動学が改めて課題となる。感染症のモデルでは、マクロな SIR モデルと異なり、マイクロに見たとき、病態間の状態遷移モデルは感染疫学的な水準から見れば必然的により詳細なものにならざるを得なくなる。すなわち  $\{s, i, r\}$  から、感染の病態進行をより詳細に表現した、 $\{s[0], i[1], i[2], i[2m], i[3m], i[3s], i[4m], i[4c], i[5], r[d], r[0i]\}$  等の区別と、その間の状態遷移モデルが必要となる。さらに未感染を示す  $s[0]$  から感染の第一ステージを表す  $i[1]$  への遷移である感染イベントそのものを分配するファクターとして、エージェントの免疫 (ワクチンーション) の有無や、都市構造、人口構造、家族構造、それらに依拠した標準活動パターンのモデル等が導入可能となる。これらはいずれもマクロモデルでは入れようのないモデル言語での記述が必要であり、それによって記述されるモデル構造としての境界条件となる。

一般に、エージェントの人口動学の形で与えられるマクロ動学は、本来の意味ではマイクロなエージェントの相互作用からなる動学へと『還元』されるべき現象論の動学である。この種の動学には、有名な生態学の捕食モデルであるロトカ・ヴォルテラ系など多くのものが知られている。これらについてもエージェント展開を行うことでより詳細なモデルの導入が可能となる。

## 2.2 エージェントの代替案選択のダイナミクス

マイクロ展開の第二の類型は、第一の類型と似ているが、エージェントの離散状態空間が、意思決定の代替案集合となっているケースである。この種のマイクロプロセスでは個々のエージェントの代替案選択の動学が何らかの形で求められる必要がある。さらに各々のエージェントの代替案の選択の結果、何らかの状態の変化が改めて各々のエージェントに生じる。

この種の動学には、繰り返し囚人のジレンマ等、繰り返しゲームとして広く知られている問題のクラスがある。そこでは代替案選択の結果生じる状態変化を利

得で、それも累積利得ベースでなく各回のフローベースで表現して、それによって意思決定が行われるというモデルを構築する場合が多い。この種のモデルは、一つは進化ゲーム論として発展している[1] [14]。他方で繰り返し囚人のジレンマのような単純なエージェント間関係への批判から、ロバート・アクセルロッドは、この種の繰り返し意思決定を含むエージェント間関係のモデルとして、エージェントベースでのシミュレーションによる動学的分析の必要性を主張した[2]。

このアクセルロッドの視点を取り入れ、より一般的なエージェントの社会学習という視点から、代替案選択の人口動学を求めることができる。これは個々のエージェントの代替案選択による平均利得が、他のエージェントの代替案選択の人口比率に影響される中で、どのような代替案選択を行い、それがどのように人口動学を導くかを問題とするアプローチであり、社会学習動学と呼ばれる[5]～[7]。

社会学習動学では、エージェントの代替案選択が“*i*”から“*j*”へと遷移する遷移確率  $P[i, j](t)$  は、 $P[j](t) \times E[j](t) / W(t)$  に比例するものとされる。ここで、 $P[j](t)$  は “*j*” という代替案を持つエージェントの人口比率、 $E[j](t)$  は “*j*” という代替案を選択することで得られる平均利得、 $W(t)$  は全てのエージェントにとっての平均利得を示す。ここでは、影響を与える先（遷移先）の人口比率  $P[j](t)$  と平均利得  $E[j](t) / W(t)$  が代替案（状態）遷移の感染力となって互いの代替案を感染させあっているモデルとして捉えられる。

$P[i, j](t) = P[j](t) \times E[j](t) / W(t)$ ,  $W(t) = \sum\{P[j](t) \times E[j](t) | j \in \text{ALT}\}$  ALT は代替案の集合を示す。ここで例えば、2つの代替案 *c* と *d* を持つ代替案選択のダイナミクスを考える（図1）。するとそこから人口比率の意味での人口動学は、マクロ変数  $P[c]$ ,  $P[d]$  の満たす微分方程式として次のようにマイクロモデルの疊み込みにより得られる。

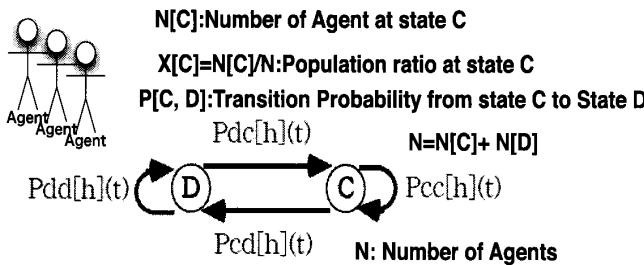


図1 2代替案選択の社会学習動学

$$\begin{aligned}
P[c, d] &= Pd(t) \times Ed(t) / W(t), \\
P[d, c] &= Pc(t) \times Ec(t) / W(t) \\
\Delta C(t) &= |\sum\{P[d, c; t](\omega) | \omega \in \Omega[d; t]\}| \\
&\quad - |\sum\{P[c, d; t](\omega) | \omega \in \Omega[c; t]\}| \\
&= |\sum\{Pc(t) \times Ec(t) / W(t)(\omega) | \omega \in \Omega[d; t]\}| \\
&\quad - |\sum\{Pd(t) \times Ed(t) / W(t)(\omega) | \omega \in \Omega[c; t]\}| \\
&= Pd(t) \times Pc(t) \times Ec(t) / W(t) \\
&\quad - Pc(t) \times Pd(t) \times Ed(t) / W(t) \\
&= Pd(t) \times Pc(t) \times \{Ec(t) \\
&\quad - Ed(t)\} / W(t)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dPc(t)/dt &= Pc(t) \times Pd(t) \{Ec(t) - Ed(t)\} / W(t) \\
&= Pc(t) \times \{Ec(t) - W(t)\} / W(t)
\end{aligned}$$

なお分析に支障が無い限り力学系として同相の、 $dPc(t)/dt = Pc(t) \{Ec(t) - W(t)\}$  という方程式を平衡点解析のためには用いる。

この社会学習動学は進化ゲームの動学を一般化したもので、アクセルロッドがシミュレーションを使って分析した、規範の崩壊とメタ規範についての分析は、この社会学習動学を用いて、微分方程式モデルの力学系の分岐理論として解析することが可能となる[2] [5]～[7]。

### 2.3 エージェントのストック・フローのダイナミクス (Micro Stock Flow Dynamics)

第三の類型は、マイクロなエージェントベースの状態変数そのものがマイクロなストック・フローの動的ダイナミクスの構造を持ち、それをアグリゲートしたものとして、マクロなダイナミクスが導出される構造を持っている場合である。これは、物理学で気体粒子の  $6N$  次元（位置と運動量）の状態変数の動学が、平衡状態で熱力学を導くような意味でのミクロなストック・フロー変数のアグリゲーションになっている。

このタイプのマイクロなストック・フロー変数とマクロなストック・フロー変数間での Unfolding 問題は、実は各家計や企業のお金や物の交換をアグリゲートすると国民経済になるという意味で、経済交換に関して広範に見いだせるミクロ・マクロリンクである。だがその扱いは、自然科学のストックフローのダイナミクスのアグリゲーション問題よりも実は難しい。それは経済交換におけるストック・フローのダイナミクスの構造に起因する。経済交換は簿記で記述される。この簿記のシステムは、個々のエージェントのストック（バランスシート：貸借対照表）とフロー（期中の残高試算表や損益計算書）からなるが、そのストック・

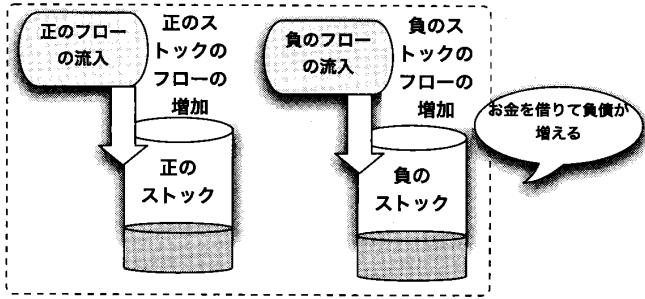


図2 負債という負のストック概念を含むシステムの状態空間

フローのシステムは、自然科学で用いるストック・フローのシステムと異なり、負債というマイナスのストック概念を状態変数として持つシステムである。負のストックを持つ状態空間は一般的な多次元のベクトル空間と異なり、交換代数という特殊な代数構造を持つ[4]～[6]（図2）。

さらにそこでの取引というイベントをベースにした動的なシステムの変化は、マイナスのストックを含む勘定科目集合で多次元化された状態空間の変動（フロー）を取りの形で記述し、それを期中で総計し、期首の貸借対照表を繰り越すことで次期の期首の貸借対照表を求めるという離散時間の動的システムとなる。

### 3. 結語

本稿では、我々はマクロモデルのエージェント展開を中心にながら、モデル展開と畳込み概念を概括し、エージェントベースのモデル策定や社会のモデリングに必須の、モデル間関係の認識論的分析を、より実践的（Pragmatic）な視点から行ってきた。科学哲学の認識論は、しばしばそれ自体は、それぞれの領域での知の構築、モデル策定作業と取りあえずは切り離して論じられることが多い。しかし広い意味での科学的なモデル言語に関する文法と意味論を含む認識論的分析とその語用論・運用論（Pragmatics）は本来切り離さるべきものではない。それは数学におけるメタ数学（数学基礎論やカテゴリー論、論理学等）が、数学それ自体の理念型の発展に寄与してきたのと同程度の重要性を持つはずである。我々は本稿でこうした知のプラグマティクスの重要性を同時に喚起したい。

社会シミュレーションのモデルは、社会の多様なシナリオを開示し、螺旋状に認識を深めるモデリングサ

イクルの中で位置付けられるべき物であり、それは方法論的反省を含む知のプラグマティクスの中で位置付けられるべきものなのである。

### 参考文献

- [1] 青木昌彦、奥野正寛編著、『経済システムの比較制度分析』、東京大学出版会、1996.
- [2] Axelrod, R., *The Complexity of Cooperation*, Princeton University Press, 1997 (寺野隆雄(監訳)『対立と協調の科学エージェント・ベース・モデルによる複雑系の解明』、ダイヤモンド社、2003).
- [3] Checkland, P. B., *Systems Thinking, Systems Practice*, John-Wiley, 1981 (高原康彦・中野文平監訳、『新しいシステムアプローチ』、オーム社、1985).
- [4] Deguchi, H. and Nakano, B., "Axiomatic Foundations of Vector Accounting," *Systems Research*, Vol. 3, pp. 31-39, 1986.
- [5] 出口弘、『複雑系としての経済学』、日科技連出版社、2000.
- [6] Deguchi, H., *Economics as an Agent Based Complex System*, Springer, 2004.
- [7] 出口弘、「エージェントベース社会システム科学の数理的基礎—社会学習動学による規範ゲームの数型的基礎付け、理論と方法」、数理社会学会、Vol. 19, pp. 67-86, 2004.
- [8] Deguchi, H., Saito, T., Ichikawa, M. and Tanuma, H., Simulated Tabletop Exercise for Risk Management-Antibio-Terorism Multi scenario Simulated Tabletop Exercise, *Developments in Business Simulation and Experiential Learning*, Vol. 38, pp. 1-21, 2011.
- [9] ヨハン・ギセック著、山本太郎、門司和彦訳、『感染症疫学』、昭和堂、2006.
- [10] ニクラス ルーマン著、徳安彰訳、『社会の科学1, 2』、法政大学出版局、2009.
- [11] オスター、ペレルソン、カチャルスキ著、今井雄介他訳、『回路網熱力学』、喜多見書房、1980.
- [12] Quine, W. O., "Epistemology Naturalized" in *Ontological Relativity and Other Essays*, Columbia U. P., 1969.
- [13] S・ラッセル, P・ノーウィング著、古川康一監訳、『エージェントアプローチ人工知能』、共立出版、1997.
- [14] Samuelson, L., *Evolutionary Games and Equilibrium Selection*, MIT Press, 1997.