

社会現象の因果関係及びモデル妥当性評価の数学的考察 「メカニズム指向ABM シミュレーション研究 II」

○名倉賢(大和大学)・荻林成章(千葉工業大学)・佐藤 浩(防衛大学校)・岩倉洋平(香川短期大学)

キーワード: ABM, 妥当性評価, 社会シミュレーション, 因果関係

1 はじめに

エージェントベースモデリング(以下ABM)におけるモデル妥当性の問題について様々な先行研究(Bianchi,C.,2007, Marks,R.E(2007)等)があるが、未だ普遍的な手法はないとされている(Collins,A.J,2024)。メカニズム指向ABM(Ogibayashiら, 2025)における妥当性評価の考え方は、

①モデルは現象の定性的特徴を再現する定性モデルと現象の定量的特徴を再現する定量モデルに分類され、
②定性モデルにおいては、現象毎に、それを引き起こす原因が、エージェントの行動ルールの集合(変数の集合を含む、以下モデル構造という)にあり、仮定した行動ルールの下で現象の定性的特徴が再現されればモデルは妥当と判断し、
③定量モデルにおいては、モデル構造に加えて、仮定したパラメータを種々変更するコンピュータ実験を行い、計算によって創発した現象の特徴が定量的に再現されればモデルは妥当と判断することを述べた。
本セッションでは、そのような妥当性の考え方が数学的考察からの必然的帰結として導かれることを示す。

2 社会システムの数学的記述

一般にシステムは相互作用するオブジェクトの集合として定義される。(Mesarovic,Takahara(1989))

$$S \subset \times \left\{ O_i | i \in I \right\} \quad O_i: \text{オブジェクト}$$

従って社会システムは意思決定主体(以後エージェントという)の直積集合で表される。各エージェントは行動によって相互作用し、かつ相互作用の仕方は行動に関わる変数の中の変数値に依存するから、人間システムは、以下のようにあらわされる。

$$S_T = \left\{ V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \right\} \text{互いに相互作用する意思決定エージェントの集合}$$

$$V_i = \left\{ A_i, N_i \right\} \text{意思決定エージェント} i$$

$$A_i: \text{エージェント} i \text{の行動ルールの集合(数を含む)}$$

$$N_i: \text{数の値の集合}$$

$$n: \text{意思決定エージェントの数}$$

ここで、変数には、エージェントの属性変数の他にシステムの状態変数が含まれる。属性変数はエージェント固有であり、計算過程で変化する変数(①)と変化しない変数(②)に分けられる。モデルシステムにおいてはNiには②の値及び①については初期値がパラメータとして含まれる。システムの状態変数は、計算過程で変化しない変数(③)、変化し初期値で与えられる変数(④)、及び変化し初期値では指定されない変数(⑤)に分けられる。Niには③の値、④の初期値がパラメータとして含まれる。行動ルールの変数の中にシステムの状態変数が含まれることが、社会システムにおける「ミクロマクロリンク」の原因となる。

3 社会現象の因果関係の数学的記述

社会現象の集合は、定性的に同じ特徴を持つ集合で表され、それは、更にその変数の値が異なるが故の定量的に異なる現象の集合で表される。

一方、全ての社会現象はエージェントの行動とその相互作用の結果生じるので、ある特定の定性的に同じ特徴を持つ現象について、因果関係を記述すると以下のようにあらわされる。

$$S_E \rightarrow M_E$$

$$S_E = \left\{ V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m \right\} \text{互いに相互作用する意思決定エージェントの集合}$$

$$V_i = \left\{ A_i, N_i \right\} \text{意思決定エージェント} i$$

$$A_i: \text{エージェント} i \text{の行動ルールの集合(数を含む)}$$

$$N_i: \text{数の値の集合}$$

$$n: \text{意思決定エージェントの数}$$

$$M_E = \left\{ m_k, k=1, \dots, s \right\}: \text{定性的に同じある特定の社会現象}, m_k: \text{定量的に異なる社会現象}$$

$$\Phi_E = \left\{ \phi_i, i=1, \dots, q \right\}: \text{現象の定性的特徴の集合}$$

上記において、定性的に同じ特徴とは、例えばある変数間の相関が正の相関か負の相関かであり、定量的に異なるとは、それらの勾配の値が異なる、という意味である。定性的に同じ特徴を有する現象は、上記式のAは同じでNが異なる現象の集合であり、定量的に同じ現象とはAに加えてNも同じということである。一方ABMは多様性とボトムアップ性を兼ね備えているので原理的に実社会と同じ原理でマクロ現象創発を起こさせることのできる計算手法である。即ち、完全にボトムアップで現実の忠実な模型としてのモデル(マクロ因子に関する仮定は一切おかない、アブストラクトでもない)なモデルであれば、ABMにおける人工社会における因果関係も上記 $S_E \rightarrow M_E$ で記述できる。上式において、現象創発の原因は、各種エージェントの行動ルール及び変数の値にあることが分かる。

ここで、マクロ現象の定性的特徴の創発に着目した場合マクロ現象の創発は主に行動ルールに依存することが分かる。実際、マクロ現象の定性的特徴再現は入力変数のパラメータには鈍感であることが指摘されている(Marksら,2007)。これらのことから定性的特徴の再現に関する因果関係は、エージェントの多様性が十分に確保されていれば、パラメータの値には依存しない、と考えられる。従って、ある特定の定性的には同じ現象の特徴集合を Φ_E とすれば、ある特定の現象の原因(行動ルール集合)と結果(マクロ現象の定性的特徴)の因果関係は次のようにあらわされる。

$$S_E = \{ A_E \} \rightarrow \Phi_E$$

4 ABMモデルの妥当性の判定基準

上述したように定性的に実現象の特徴を再現するために必要不可欠な行動ルール集合が存在する。この行動リユールの集合がモデルの構造を規定することから、これをモデル構造と呼ぶ。そしてその時のモデルにおける因果関係は、下記式で表される。

$$S_M = \{ A_M \} \rightarrow \Phi_M$$

$$S_M = \{ A_M \}: \text{モデル構造}$$

$$\Phi_M = \{ \phi_i, i=1, \dots, q \}: \text{定性的に同じ現象を特徴づける要因の集合}$$

この時、以下の命題が成立するといえる。

$$(1) \Phi_M = \Phi_E \text{であれば} \{ A_M \} \supseteq \{ A_E \} \text{である。}$$

$$\because \{ A_E \} \text{は} \Phi_E \text{創発に必要な不可欠な行動ルールの集合であるから、もし上記関係が成り立たなければ} \Phi_M \neq \Phi_E \text{となり仮定に矛盾する}$$

$$(2) \text{上記において} A_E \text{に含まれるシステム状態の集合を} \{ V_S \}$$

$$\text{数の決定に影響する現象の特徴の集合を} \Phi_{VS} \text{とし}$$

$$\text{その原因となる必要不可欠な行動行動ルール集合を} \{ A_{VSE} \} \text{とすれば}$$

$$\{ A_{VSE} \} \subset \{ A_E \}, \{ A_{VSE} \} \subset \{ A_M \}$$

$$(3) \Phi_M = \Phi_E \text{の時モデルは実システムの準同型写像であり}$$

$$\text{モデルにおける現象創発メカニズムは実システムにおける現象創発メカニズムと等しい。}$$

上記において、(1)はモデルにおいて実システムの現象の特徴が再現されれば、そのモデルは妥当といえる、ということである。(1)について言及すべき点が2点ある。一つはモデルは可能な限り実システムと類似であることが前提ということである。このことは、例えば経済モデルの場合、経済は貨幣で記述されるので、各エージェントは取引ごとに複式簿記会計で取引を記述し、それをもとに毎期決算処理を行い、システム全体としては各エージェントの決算結果を集計して産業連関表を算出し、それをもとにGDPを計算する、ということが必須である。しかるに現時点でも経済モデルを標榜するABMモデルにおいて、このように現実と同じ方法でGDPを計算している文献は、筆者の一人らの研究(ogibayashi, 2022)を除いて殆ど見られない。

また上記(1)において、実システム現象の特徴が複数ある場合、一つの行動ルール集合で全ての特徴が再現される場合もあれば、複数の特徴の中の一部の特徴のみが再現される場合もある。後者の場合、再現されなかった現象については、追加の行動ルールが必要といえる。即ち、再現される特徴とその原因となる行動ルールは互いに加算的である。

例えば、T.Scheling(1969)の住み分けモデルの場合、現象の特徴は異なる人種の居住領域がすみ分ける、ことでありその再現に必要なモデル構造は、エージェントの住居地選択に隣人の人種に対するわずかな嗜好の差が影響する、ということである。この場合、住み分け事態が定性的な特徴であり、その形状は無関係である。NetLogのような市販ABMソフトウェアではエージェントの空間的浄法を計算結果として提示するために定性的特徴と定量的特徴の認識上の混在がこのモデルをアブストラクトモデルと断じた原因となっている可能性がある。住み分けの形状や形態についての特徴が実システムに存在し、それABMで再現するためには、T.Scheling(1969)の行動ルールに新たに別の行動ルールを追加することが必要である。この意味で、再現される特徴と原因となる行動ルールは互いに加算的と考えられる。

上記の(2)は、変数の中にシステムの状態変数が含まれる場合、 $\{ A_i \}$ にはその状態変数に関わるマクロ現象の特徴の創出の原因となっている行動ルールが含まれなければならないことを意味している。

このことから、一般に社会現象の創発に必要な不可欠なモデル構造を明らかにする場合には、単純な系から複雑な系へと順を追って研究を進めていくことが必要と考えられる。

5 結論

前報で示したメカニズム指向ABMモデルの実行手順で全てのに社会現象の特徴は人間の行動とその相互作用の結果として生じる、という命題から必然的に導かれる方法と考えらえる。

参考文献

- (1) Bianchi,C.,Cirillo,P.,Gallegati,M, and Vagliaiindi,P.A. Validating and Calibrating Agent-Based Models: A Case Study, Comput Econ,30,245–264,(2007)
- (2) Marks, R. E. Validating simulation models: A general framework and four applied examples. Computational economics, 30(3), 265–290.(2007)
- (3) Collins, A. J., et.al. Method That Support the Validation of Agent-Based Models: An Overview and Discussion, JASSS, 27(1),11,2024
- (4) Ogibayashi,S. Sato H.,Nagura K.and Ishikura,Y. Aproposal of A Methodlogy of Validation and Scientific Model Building in Agent-Based Modeling, Mechanism-Oriented Agent-Based Modeling Study I , JASAG Spring meeting,May, 25,Tokyo,2025
- (5)Mesarovic,M.D. and Takahara Y. Abstract Systems Theory, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, 1989
- (6) Ogibayashi, S. Model structure of Agent-Based Artificial Economic System Resonsible for Reproducing Fundamental Behavior of Goods Market. In Yuji Aruka (ed), Digital Designs for Money, Markets, and Social Dilemmas, pp89–141, Springer (2022)
- (7) Shelling, T.C.. Model of Segregation, American economic review, Papers and Proceedings, 59 (2) 488–493.(1969)