

ABMにおけるモデル妥当性に関する一考察

Study on the Validation of Agent-Based Models for Macro Economic Systems

荻林 成章*

Shigeaki Ogibayashi

千葉工業大学経営情報科学科

高島 幸成*

Kosei Takashima

千葉工業大学附属研究所

要旨: 前報では景気循環及び減税効果を再現するために必要不可欠なモデル条件を示した。本報では、前報で示した効果を経済的側面から考察し、前報で明らかとなったモデル条件に関する結果の妥当性をメカニズムの観点から検証する。その上で、ABMにおけるモデルの妥当性について考察した。ABMにおいてマクロ現象が再現されるための条件は、定性的にはモデル構造、定量的にはモデル構造に加えてパラメータ値の比で表すことができ、それらはコントロールされた計算機実験により明らかにでき、またその過程でマクロ現象に関わるメカニズムに関する知見が得られると考えられる。

Abstract: This study discusses the validity of the ABM, discussing the condition for the model to reproduce business cycles and the influence of tax reduction on GDP from the view point of the behavior and its mechanism of macroeconomic systems. The reason for the existence of the necessary model structure in agent-based modeling is also discussed. Based on these results, it is considered reasonable that the necessary model structures responsible for reproducing each of the macroeconomic behavior can be clarified by a series of controlled computer experiment in which only one factor is changed with other factors being held constant, through the procedure of which the mechanism of the macroeconomic behavior can be also elucidated.

1. 研究背景

エージェントベースモデリング (ABM) はマクロ的仮定をおかずに意思決定主体のミクロ的な行動ルールを仮定してそれらの相互作用の結果としてどのようなマクロ現象が創発されるかを観察するボトムアップなモデリング手法である [1]。

ABM は個々のエージェントの限界合理性と異質性、及び社会システムの非平衡な動的変化様式を取り扱うことのできる有望な方法論ではあるが、妥当性が大きな問題とされており、種々の報告がなされている。

経済学者による典型的な ABM 批判の一つは「あるモデルがあるマクロ現象を説明できたとしてもそれが唯一のモデルという保証はないので、得られた結果から何も新しい知見は得られない」 [2] というものである。これらは「ヤッコー批判」と呼ばれている。類似の主張として、Marks [3] は、「ABM の計算結果として得られるマクロ現象はインプット条件に鈍感であるので、ABM では、マクロ現象創発の十分条件を示すことはできても必要条件を示すことはできない、その理由は ABM に内在する複雑性に起因している」と述べている。また別の視点として、モデルの妥当性を示す比較対象としてのシステムは我々の認識とは無関係に存在するとする伝統的な、経験主義的妥当性概念と、比較対象システムは解釈者の主観によって異なるとする解釈主義的妥当性概念が

あり、モデルの解像度 (Abstract, middle range, facsimile の各モデルレベル) によって妥当性概念をミックスして用いるべきとする提案もなされている (柴, [4])。

実際、社会システムの挙動は複雑であり、かつ自然システムのような実験的アプローチが困難であるため ABM の計算結果の妥当性を経験主義的な概念で主張するには限界があると思われる。しかしながら、社会システムの一つとしてマクロ経済システムを取り上げれば、ABM と比較すべき事実は、少なくとも定性的レベルでは数多く存在し、それらの多くは統計的手法や歴史的なデータの積み重ねによって明らかにされている。前報で示した景気変動や減税乗数などはその一例である。そして、マクロ経済現象の ABM 研究における著者らの経験では、モデルのインプット条件を、種々のパラメータ値ではなく、モデル上のシステム構造、すなわち、システムに内在するエージェントの種類とその行動および、エージェントが活動する場 (市場など) で表せば、マクロ現象の創発はこれらのインプット条件に大きく依存し、結果として実システムのマクロ現象を再現するためにモデルが具備すべき必要条件を示すことができると思われる。

本稿では、前報の ABM 解析結果を、景気循環および所得税・法人税の減税乗数効果を再現できるモデル条件の観点から、研究事例として要約し、結果の妥当性をメカニズムの観点から検証し、モ

デル構造に着目した ABM におけるモデル妥当性の概念を提案する。

2. 研究事例

前報[5]では消費者と生産者が相互に売買を行う製品財市場の相互作用の範囲において景気循環挙動を再現することのできるモデル構造、及び消費者、生産者、銀行、及び政府を内包するモデルにおける GDP に及ぼす減税の影響を再現するモデル構造についてそれぞれ解析を行った。

その結果、景気循環挙動については表 1 に示すように生産者が需要に基づいて意思決定を行い、その際に銀行借入を伴った資金調達を行う条件の時に景気循環挙動が再現できることがわかった。一方、表 1 に示すように、投資を行わない条件、資金調達手段として自己資金や新株発行など銀行借入を全く含まない条件、設備投資判断が需要に無関係にランダムに行われる条件、では景気循環挙動を再現することができなかった。また内部収益率に基づく投資判断の条件は、Keynes[6]の述べる資本の限界効率の変動によって景気循環が生じるかどうかを確認したもので、設備の廃棄および設備価格の変動、およびそれらによる製品財価格の変動を考慮したモデルを構築して解析したが、自己資金のみによる資金調達（銀行借入なし）では資金循環挙動を再現することができなかった。なお、内部収益率による投資判断の場合に、生産性の設備個数依存度を極めて大きい値に仮定すれば銀行借り入れ無しでも微弱な変動が創発された。このことから、内部収益率による投資判断のモデル構造が景気循環に全く影響を及ぼしていないと断じることはできないが、需要に基づく投資判断と銀行借入の影響に比べれば小さい影響因子であることがわかった。

以上より、景気循環再現のためには、モデルは生産者の投資行動、需要に基づく投資判断、銀行借入を伴う資金調達、を内包したモデル構造であることが必要であるといえる。また銀行借入が必要条件であることは銀行による信用創造のメカニズムが必須要件であることを示している。なお、このモデル構造において景気循環が発生するメカニズムはモデル内で計算された種々のマクロ経済指標の挙動を解析することにより解明でき、その要点は次のようにまとめられる。

生産競争力の高いあるエージェントが設備投資を行い銀行借入を行うと、市場を流通する貨幣の量が増加しそれが新たな需要を生み出しで景気拡大の好循環が進行する。一方信用創造による借入可能金額には上限が存在するので、設備投資が一巡すると借入より返済の資金フローが大となり市場を流通する貨幣の量が低下し消費者の所得低下、需要低下が進行し GDP は下降する。返済がある程度進行して生産者の借入余力が増

加すると、一部の競争力大の生産者から設備投資が起り始めその連鎖で再び景気拡大期が訪れる。景気循環メカニズムには諸説あり[7]、様々な説を否定するものではないが、本研究の ABM 解析から実システムにおいても類似のメカニズムが支配的に進行して景気循環が生じているものと推定される。

上記の結果は、景気循環に関わるその他の因子の影響を否定するものではない。より影響度の小さい因子について、マクロ現象の再現およびメカニズムの解明を行うためには、モデル構造に加えてパラメータを含むモデルインプット条件の影響を解析することが必要になるものと推定される。

表 1. 景気循環挙動再現の条件

投資行動	投資判断	資金調達	市場	景気循環の再現
無し		-	製品財	×
有り	需要	銀行借入	製品財	○
	需要	自己資金	製品財	×
	需要	新株発行	製品財+株式	×
	需要	新株発行+銀行借入	製品財+株式	○
	ランダム	銀行借入	製品財	×
	内部収益率	自己資金	製品財	×

一方、減税の GDP に及ぼす影響に関する、モデル構造とマクロ現象再現との関係を表 2 にまとめた。ここで、政府支出の非効率度とは、政府支出を完全に市場ルールで消費する額と無目的に生産者に補助金として分配する額の合計に対する補助金の割合である。表 2 に示すように、所得税については政府支出の非効率性の存在を仮定することが GDP に及ぼす減税の効果を再現するための必須要件であることがわかった。その理由はモデル内で起こっている現象を解析することにより解明でき、その要点は次のとおりである。

消費者は所得の一部を貯蓄するため、政府がその額を税として徴収し完全に市場原理で市場からものを購入する（すなわち政府支出の非効率度=0）ならば、税率を上げることにより市場を循環する資金が増加し、需要が増加して GDP が増加する。従って減税による GDP 増加が起こるための必要条件是、政府支出の非効率度が消費者の貯蓄率以上であることであり、現実システムでも同様のメカニズムで減税効果が現れているものと推定される。

一方、法人税減税による GDP 上昇を再現するためには、政府支出の非効率性に加えて、経営者報酬、設備投資の為の資金に自己資金利用、同一の生産者が同時に行える借入の上限数の緩和を内包したモデル構造が必須であることがわかった。これらのうち借入上限数の緩和は、実システムにおける銀行借入が起りやすい投資環境、に相当する。これらの要因の内、最も影響の大きい要因は、政府支出の非効率性、経営者報酬および

自己資金利用であった。これらを内包するモデル構造が減税効果を再現するための必須要件である。その理由もモデル内では様々な経済指標の挙動を解析することにより明らかにすることができ、その要点は以下のとおりである。

モデル内で減税による GDP 上昇が再現されるためには、減税によって生じた生産者の余剰資金が市場で消費されるモデル構造が必須である。経営者報酬は余剰資金の一部が経営者を通じて需要増加をもたらす、設備投資資金に対する自己資金利用は、余剰資金の一部が設備投資を通じて需要増加をもたらす。一方財政均衡条件下では減税は政府支出を低下させ、それは GDP 低下要因となる。従って、法人税減税が GDP 増加をもたらすためには、政府支出の効率性より、民間の消費支出の効率性が大きいことが必須であり、そのためには、上記の3要因を内包したモデル構造が必要である。以上はコンピュータ実験により明らかとなった、モデル内で創発される現象のメカニズムであるが、実システムでも類似のメカニズムで減税効果が創発されているものと推定される。

表 2.減税の影響再現条件とモデル構造

政府支出の非効率性	経営者報酬	投資への自己資本利用	同時借入制限	GDPと所得税率の関係	GDPと法人税率の関係
存在しない	すべての条件			正の相関	正の相関
存在する	有り	有り	有り	負の相関	負の相関
	有り	有り	無し	負の相関	正の相関
	有り	無し	無し	負の相関	正の相関
	有り	無し	有り	負の相関	正の相関
	無し	有り	有り	負の相関	正の相関
	無し	有り	無し	負の相関	正の相関
	無し	無し	有り	負の相関	正の相関
	無し	無し	無し	負の相関	正の相関

また、現実システムでは減税によって失業率が改善することが示されている[8]ことから、減税により失業率低下が需要増加をもたらしている可能性も考えられる。そこで、ベースモデルに労働市場を追加し、生産者能力調整手段として雇用の拡大・縮小を考慮し設備投資と雇用拡大を利益水準に応じて選択する条件を内包したモデルも構築し解析を実施した。その結果、解雇・雇用行動、及び労働市場を内包したモデル構造においても、表 2 に示す GDP と税率の関係に変化はなく、労働市場は必要条件ではないことがわかった。

以上の結果は、モデルの構造を変化させる実験を行うことにより、ABM においてマクロ現象再現のための必要不可欠な要因とそうではない要因を解明することが可能であることを示している。

3.ABM における妥当性の条件

ABM における批判の多くは、その計算結果が正しいということをどのように証明するか、という疑問に対して明確に答えられないことに起因していると思われる。その一つの原因は、モデル

の妥当性の議論が、2種類のインプット条件、すなわちモデル構造と種々のパラメータ値を明確に区別することなく行われてきたことにあるのではないと思われる。

上述の研究事例は、少なくとも定性的なレベルでは、あるマクロ現象を再現するための必要不可欠なモデル構造が存在し、それらは要因の一つずつ変更する計算機実験によって明らかにできることを示している。以下にその理由および ABM における妥当性の条件について考察する。

システムは相互作用するオブジェクトの集合であり、集合上の関係として定義される[9]。社会システムの場合、オブジェクトは各種の自律的な意思決定主体（すなわち個人や法人等のエージェント）および彼らが活動する場（市場など）、であり、関係とはそれらの相互作用を表す。このことから、「社会システムのマクロ現象はこれらの場で活動する各種エージェントの行動と相互作用の結果として創発される」ということができる。

従って、エージェントの種類や行動ルールの集合、彼らが活動する場の集合、およびそれらの属性（パラメータ値）がモデルと実システムとで類似であれば、モデルにおいて創発されるマクロ現象は実システムのそれと類似になるといえる。

これらの因子の中で、エージェントの種類とその行動ルール、エージェントが活動する場は、モデル上のシステム構造、すなわちモデル構造に関わる因子であり、それらの属性はパラメータ値に関わる因子である。モデルと実システムの間でこれらの因子がどの程度類似でなければならぬかは、対象とするマクロ現象や類似の程度（すなわち定性的か、定量的か）によって異なる。

Marks[3]が述べているように、多くのマクロ現象はパラメータ値に鈍感であり、これが ABM 批判の根拠の一つになっている。

しかしながら、このことは逆に、モデルと実システムの類似性を定性的なレベルで比較する場合には、パラメータ値としてどのような値を仮定するかは解析結果にさほど大きな影響を及ぼさないことを示している。従って、モデル上で創発されたマクロ現象を実システムのマクロ現象と比較する場合に、その比較が定性的なレベルの範囲内では、妥当評価に関わる重要な因子はパラメータ値ではなく、モデル構造であるといえる。

以上より、ABM において実システムのマクロ現象の創発を再現するための必要条件は、定性的なレベルではモデル構造が実システムと類似であること、更に定量的なレベルではモデル構造に加えてパラメータ値が実システムと類似であること、と言える。

Gilbert[10]はモデルの妥当性評価はモデルの精緻度のレベルによって異なるとして、モデルを Abstract model, Middle range model, facsimile

model に分類したモデルの類型を行っている。

上述のモデル妥当性の条件をこの分類に基づいて行えば、モデルのマクロ現象が実システムのそれと類似であるための必要条件は、Abstract model では、モデル構造が実システムと類似であること、Facsimile model ではモデル構造に加えてパラメータ値が実システムと類似であること、と言い換えることができるであろう。

ABM ではマクロな仮定を置かず、ミクロな仮定のみからボトムアップにマクロ現象が創発されるため、定性的なレベルでモデルの妥当性を評価する限りにおいては、モデルの構造の類似性と創発されるマクロ現象の類似性の間には一体一の関係が成り立ち、またその際に創発されるマクロ現象の創発メカニズムにおいても、モデルと実システムの間で一体一の関係が成り立つものと考えられる。

前述した研究事例において、マクロ現象を再現するためのモデル構造が要因を一つ一つ変更するコントロールされた計算機実験により明らかにされ、その際に計算結果として同時に得られる様々なマクロ指標の挙動を同時に解析することにより、モデルにおいて着目するマクロ現象が創発されるメカニズムを明らかにすることができたが、そのようにして判明したマクロ現象創発のメカニズムにおいても実システムとの類似性が成り立っているものと考えられる。

このことから、ABM において種々のマクロ現象再現のためのモデル構造を明らかにし、それらの知識を蓄積することにより、マクロ現象が創発されるメカニズムが明らかになっていくものと期待される。

なお、前述の研究事例においても見られたように、定性的レベルの解析において、実システムのマクロ現象再現のための必要なモデル構造と判定されなかった因子についても、そのマクロ現象創発に対して全く無関係であるという保証はない。現実のマクロ現象の創発メカニズムにおいても、原因となるインプット条件の因子は複数存在することは多い。因子によって異なるのはその影響の度合いである。影響の度合いが小さい因子については、おそらくマクロ現象再現の必要条件の中にモデル構造だけでなくパラメータ因子も含まれてくると推定される。

その場合、マクロ現象再現に必要なパラメータ値の類似性に関しては、自然システムにおける相似則のアナロジーで考えれば、必要となるのはその絶対値の類似性ではなく、種々のパラメータ値との比の一致性であろうと推定している。

以上のことから、ABM において実現象を再現するためのモデル条件は、定性的にはモデル構造で表すことができ、定量的にはモデル構造に加えてパラメータの比で表され、それらは要因を個々

に変更する計算機実験により解明することが可能と考えられる。またそれによってマクロ現象創発のメカニズムに関しての知見が得られるものと考えられる。

4. 結論

ABM におけるインプットはモデル構造に関わる因子とパラメータ値に関わる因子で構成され、実システムのマクロ現象を再現するために必要不可欠なモデル構造が存在し、これまでの ABM 解析結果より、モデル構造が実システムと異なれば、定性的レベルにおいても実システムと類似のマクロ現象を創発することはできないことが実験的に判明した。またその理由を考察した結果、これらの結果は、社会システムにおけるマクロ現象がシステムを構成するエージェントの行動とその相互作用の結果生じることからくる当然の帰結と考えられる。この際、影響度合いの小さい因子についてマクロ現象創発との関係を明らかにする場合や、定量的妥当性を問題とする場合には、モデル構造だけにとどまらずパラメータ値の実システムとの一致性が問題になってくると推定されると考えられるが、その場合にも一致性が特に必要となるのはパラメータ値の比であろうと推定される。

参考文献

1. Epstein, J.M., & Axtell, R. (1996). Growing artificial societies: social science from the bottom up. *Brookings Inst. Press: Washington, DC* [ua].
2. Ormerod, P., & Rosewell, B. (2009). Verification and validation of agent based models in the social sciences. In *Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences* (pp. 130-140). Springer Berlin Heidelberg.
3. Marks, R. E. (2007). Validating simulation models: a general framework and four applied examples. *Computational Economics*, 30(3), 265-290.
4. 柴直樹.(2010). エージェント・ベース・アプローチにおけるモデルの妥当性について. *経営情報学会春季全国研究発表大会要旨集*
5. 高島幸成, 荻林成章.(2014). 景気循環及び租所得税・法人税の減税効果再現の為の ABM モデル条件. *経営情報学会 2014 年秋季全国研究発表大会*.
6. John, M. (1936). Keynes, The general theory of employment, interest and money. *DE Moggridge (Ed.)*, 7.
7. Onwumere, R., Stewart, R., & Yu, S. (2011). A review of business cycle theory and forecast of the current business cycle. *Journal of Business & Economics Research (JBER)*, 9(2).
8. 佐久間隆, 増島稔, 前田佐恵子, 符川公平, & 岩本光一郎. (2011). 短期日本経済マクロ計量モデル (2011 年版) の構造と乗数分析. *内閣府経済社会総合研究所『ESRI ディスカッションペーパー』*, (259).
9. Mesarović, M. D., & Takahara, Y. (1989). *Abstract systems theory*. Springer-Verlag (Berlin and New York).
10. Gilbert, N., Agent-based models, sage Publications, (2007)

