エージェント・シミュレーションによる交通システムメカニズムの解明*

An analysis of transportation system mechanism by the agent-based simulation*

中山晶一朗**
By Shoichiro NAKAYAMA**

1．はじめに

交通システムは相互作用がある多数の主体から構成され，日々変化する動的で複雑なシステムである．このようなシステムのメカニズムの解明の一つのアプローチがエージェント・シミュレーションである．この手法は，シミュレーションのために比較的自由度の高いモデル構築が可能である．本論文では，紙面の制約上，交通システムメカニズムの解明のためのエージェント・シミュレーションの意義についてのみ著者の観点からまとめる．

2．行動主体の意思決定プロセスの記述

均衡分析では，行動主体に対して効用最大化もしくは完全合理性が仮定される．しかし，Simon (1947)[1] が指摘したように，人間の合理性は完全なものではなく，限定的なものである．すなわち，人間は環境に関して不完全な知識しか持っておらず，また，その情報処理能力は限られており，可能な行動の全てを検討することはできないため，人間の合理性は限定的なもの，すなわち限定合理性となる．

ある状況において採用される行動が目標に対して適切であることを「目的合理性」という．このように規定される「目的合理性」の概念は，「実体的合理性」（substantive rationality）と「手続的合理性」（procedural rationality）に分けて考えることができる．

外的環境の諸条件が行動主体に課してくる制約を与件として，主体が目標を達成する上でもっとも合理的な選択を行う場合，この主体の行動は実体合理的であると定義される．このような実体的合理性の下では，行動の合理性は目標というただ一つの観点から判断される．これと対照的に，行動が適切な考慮の結果である場合，すなわち行動が生み出されるプロセスの観点から見て合理的である場合，それは手続合理的であると規定される（Simon, 1976[2]）．行動主体が手続的に合理的である場合，行動と目標の客観的な関係からはその合理性は限定的なものとなる．つまり，手続的合理性と限定合理性は同一のものを異なった視点から見たものであり，人間の合理性を積極的に捉えれば手続き的合理性となり，消極的に捉えれば限定合理性となると考えられる．

ランダム効用理論を用いた交通行動分析においては，効用関数が推定されれば，説明変数に客観的な値を代入することによって，行動の予測を行う．これは，客観的世界と主観的世界を区別せず，行動は現実あるがままに認知した結果であることを前提としている．しかし，人間が処理できる情報は限られたものであるため，入手できる情報の一部もしくは大部分を削除されるため，環境に対して現実と異なったものとして認知していると考えられる．つまり，限定合理性下では，行動主体の認知する世界（主観的世界）と現実世界とは区別する必要がある．したがって，行動主体の認知過程を明示的に考慮する必要がある（Simon, 1963[3]）．予測する場合やマクロ的な状態を記述する場合にでも，客観的世界と主観的世界が一致しないとなると，客観的な値を元にして行動を予測・記述すると，その結果は系統的な誤差を生む危険性を孕むことになる．

行動主体の完全合理性を仮定した場合，効用理論によって，主体の行動を効用が最大化された「状態」として記述することができる．この時，外的環境の諸条件さえ与えれば，行動を記述することができる．行動を記述するために必要な情報は外的な環境に関するものだけであるとともに，行動主体がどのようなプロセスを経て行動を決定したのかという点に関しては全く取り扱う必要がない．しかし，（実際の人間がそうであるように）行動主体に対して限定合理性を仮定する場合，行動を単に効用が最大化された「状態」として記述することはできない．限定合理性は行動が決定される「プロセス」を考慮した合理性であり，行動記述にも「プロセス」の観点が必要である．

---

*キーワーズ：エージェント・シミュレーション、プロセス記述、複雑システム

**正員、博(工)、金沢大学理工学域環境デザイン学類
（金沢市角間町、TEL076-234-4614、FAX234-4644
snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp）

3．エージェントシミュレーションの意義

（1）プロセスと複雑システム

前章では，人間の行動は限定合理的なものであるため，それを効用の最大化された「状態」として記述することは出来ず，その行動が決定される過程である認知過程を考慮しなければないことを示した．このように交通行動を捉えた場合，従来までのように均衡という「状態」として交通システムを捉えることはできず，その「プロセス」を考慮することが必要になる．

このように「プロセス」の視点から捉えた交通システムは，均衡分析のような単純なシステムではなく，動的で複雑なシステム，すなわち，複雑系であると考えられる．ここで，複雑系とは如何なるシステムであるのか，どのような特性を持つのか，そして，複雑系を研究するためにはどのような方法論を用いるべきであるのか，について述べる．これらを明らかにすることは，複雑系である交通システムを理解する上での概念を提供し，これから研究を進める上での方法論を明らかにすることになると考えられる．

近年，複雑系という言葉が頻繁に聞かれるようになったのは，Waldrop (1992)[4] の「複雑系」によりその存在が広く知られるようになったのが発端であろう．しかし，複雑系が広範に知れ渡ったにもかかわらず，複雑系とは何か，という問題はそれほど明確になっていないと言える．

複雑系とは，もちろん複雑なシステムのことである．複雑系とは何か，を考える場合，その「複雑」が何を意味するのかが問われる．複雑系における複雑性（complexity）とは，多くのものが関連することを意味する「込み入った」（complicated）とは区別される．単に多くのものが関係するだけならば，分離・整理すれば理解することが可能である．しかし，複雑性（complexity）は，そのように分離することによって理解することが出来ないことを意味している．したがって，複雑系は，多くの場合，部分によってはその全体を理解することが出来ないシステムと考えられている．このような複雑系においては，全体は部分の総和以上であり，部分を理解するだけで全体を理解することはできず，逆に，部分も全体を理解して初めて分かるようになる．以上のような複雑系を対象とする研究における問題意識は，これまでの科学が，対象システムを基本的な構成要素に分解し，その性質を構成要素の性質に還元して説明しようという要素還元論の限界の克服とも考えられる．

しかし，現在の複雑系研究の以前から，全体は部分の総和以上であるという主張はなされていたし，複雑系もしくは複雑性への関心は持たれていた．現在の複雑系の研究の特徴とは何であろうか，従来までと異なる点はあるのだろうか．

Simon (1996)[5] は，複雑性（complexity）のどの側面に注目したかによって複雑系の研究を三時代に区分している．最初の時代は第一次世界大戦後である．この時代では，全体は部分の集合以上のものであるという主張に焦点が注がれていた．次は，第二次世界大戦後のサイバネティクス（Wiener, 1948[6]）や一般システム理論（e.g. von Bertalanffy, 1971[7]）等の隆興の時代である．この時代における重要な概念は，フィードバックや階層性である．サイバネティクスにおいて提唱されたフィードバックの概念は，科学の中に「目的」という概念が導入される素地をつくった．また，階層に関しては，それ自体は古くから議論がなされてきたものだが，それが複雑なシステムが進化・生成するのを極めて有利にするものであるなどの特性が明らかにされた（Simon, 1962[8]）．Von Bertalanffy (1971)[7] は著書「一般システム理論」の中で，要素還元論に基づく研究方法を分析的手法（analytical procedure）と呼び，それが適用できる二つの条件を示している．一つは，要素（部分）間の相互作用が全く存在しないか，あるいは一定の研究目的にとって無視できるほど十分に小さいことであり，もう一つは，要素（部分）の振る舞いを記述する関数が線形であることである．このような条件が成立しないシステムに関しては，分析的手法によってその全てを理解することは出来ないとしている．第三の時代は，主に数値計算やシミュレーションを使用することを通して新しい概念やそのための手段が生まれたことによるものである．カオス，創発（Polanyi, 1966[9]；Klee, 1984[10]），人工生命（Langton, 1989[11]）や遺伝的アルゴリズム（Holland, 1975[12]；Goldberg, 1989[13]），セルラーオートマトン（e.g. 加藤等, 1998[14]）がそれらである．

現在の複雑系研究は Simon (1996)[5] の言う第三の時代であり，その特徴の一つとしては，計算機の使用もしくは計算機による様々な現象やモデルの「構成」（synthesis）にあると考えられる．その顕著な例は人工生命である．人工生命は実際に生命や進化を計算機上に「構成」しようとするものである．遺伝的アルゴリズムやセルラーオートマトンの開発を背景として計算機の使用もしくはシミュレーションにより従来までの還元論が捉えられなかった複雑な現象を取り扱えるようになったことが現在の複雑系研究の興隆に大きく貢献していると考えられる．

（2）シミュレーション

複雑系を対象とする研究を行う場合，シミュレーションが極めて重要な役割を果たす．

シミュレーションとは，本来，「模擬」という意味であり，それは現実そのままではなく，そのモデルを構

成して，ある現象を模倣することを指すとされる（中西，1971[15]）．シミュレーションは，ゲーミングなども含んでいるものの，近年ではそのほとんどがコンピュータを用いるものである．したがって，特に断りがない限り，シミュレーションは，コンピュータ上で実験を行う数値的手法を意味することがほとんどである．

シミュレーションの使用目的は主に二つである．一つは対象システムの予測・再現のためであり，もう一つは対象システムの理解のためである．

実際のシステムを用いると経済的・時間的コストが多くかかる場合や実験が現実的に不可能な場合，実物に代わってシミュレーション・モデルを用いることになる．このような予測・再現のためのシミュレーションにおいては，出力された値自体が重要であるため，パラメータを統計学的な手法によって推定されたものを用いることなどによって，その信頼性を高める努力が必要である．交通工学の分野においても，その種のシミュレーションとしては，従来から交通流のシミュレーションモデルが盛んに研究されてきた．また，近年では，一人一人のアクティビティをシミュレートすることによって交通需要予測しようとする研究も始まっている（e.g. 北村，1996[16]）．

もう一つは，対象システムを理解するために，システムの本質を抽出した仮定などからモデルを構築するものである．シミュレーション結果は定性的な意味で解釈され，そのモデル化自体は比較的単純なものとなることが多い．交通工学の分野においては，例えば，Mahmassani et al.（1991）[17] を挙げることができる．それは情報提供による効果分析のためのシミュレーション分析であり，情報提供を行ったとしても必ずしも全体の平均旅行時間は低下するとは限らないことなどを明らかにしており，得られた知見として重要なものは定性的なものとなっている．

シミュレーションを現在のような形で初めて用いたのは，1940年代の末のvon NeumannとUlamであったといわれる．彼らは，原子力関係の防護問題を解く必要があったが，実験的に解を求めるには多額の費用がかかるし，解析的に解くには複雑になり過ぎるため，モンテカルロ分析を行った．シミュレーションの主な二つの利点はここに見出される．すなわち，一つは記述性・操作性の高さであり，もう一つは経済的・時間的な節約である．

解析モデルにおいては，研究対象が複雑である場合，定式化における制約からそれを取り扱うことが困難である．このとき，シミュレーションならば容易に記述することができる．しかし，解析モデルのように一般的な知見を引き出すには多くの数値実験を必要とし，また，シミュレーションで構築したモデルは複雑になりがちであり，作成者以外にとって非常に分かりにくくなる危険性もある．これは，解析モデルの利点の裏返しである．したがって，いずれの手法のほうが優れているのかを比較することは出来ず，相互に補完的な役割を持つものである．いずれの手法を用いるのかは研究の視点や目的に依存することになる．

一般に科学の分野では，主に理論と実験・観測によって研究が進められてきたといえる．すなわち，様々な現象は，実験や観測によって，また，理論の構築によって解明されてきた．これらの研究形態は今後も続くものであるが，近年の計算機の発達に伴い，シミュレーションを用いた研究形態が確立されようとしている．物理学においては，シミュレーションを用いた研究は「計算機物理学（シミュレーション物理学）」として市民権を得ている．認知心理学では，人間の思考・推論を計算機の情報処理に見たてた情報処理アプローチが約半世紀前から起こり，シミュレーションモデルの構築が重要視されてきた（Anderson, 1980[18]）．また，社会学，社会心理学や政治学の分野でも，近年，計算機上で仮想社会を構築する試みが行われており，それは「人工社会（artificial society）」（Esptein & Axtell, 1996[19]），「マルチエージェントシミュレーション（multi-agent simulation）」（Shoham, 1994[20]），「エージェント・ベース・アプローチ（agent-based approach）」（Axelrod, 1997[21]）などと呼ばれている．

（3）シミュレーションにおける方法論

既に述べたように複雑系は還元論的な手法，すなわち，「分析」（analysis）的な手法によっては捉えることができないシステムである．このような系に対しては，「構成」（synthesis）な手法が一つのアプローチとなる．構成論的手法は人工生命においては必須の方法論であり，人工生命では，それは計算機などの媒介体上に生命的な振る舞いを「構成」するというものである（Langton, 1989）．また，カオス系においても，構成論的に仮想世界を構築するという手法を用いる研究が行われている（金子・津田，1996[22]）．

本研究においても，複雑系として交通システムを取り扱うために構成論的に「仮想世界」を構築する．このような方法論は従来までのものと大きく異なる点がある．その一つは，この仮想世界は必ずしも現実を出来る限り忠実に反映させようとは試みていないことである．むしろ，現実とある程度の「距離」があることが意味をもつ場合がある．それは，小説・演劇といったものを例にとると考えやすい．小説・演劇といったものは，大抵がフィクションである．しかし，フィクションであるが故に，真実を真実以上に伝えることが可能となる場合がある．捉えどころのなく複雑なものである社会や人生といったものを我々が捉えようとするには，現実を忠実に描写し

たものより，編集され，脚本された一つの「物語」が我々に深い洞察を与えてくれる．このような社会や人生といったものは，本来的には，一つの法則や理論によって捉えることの出来ないものであり，我々がそれらを理解することは容易ではない．「物語」は仮想的で，人工的なものであり，現実をどれほど反映したものかは十分に明らかではない．しかし，社会や人生とはどの様なものかを単なる事実の集合より雄弁に真実を語り得る．複雑系を捉える方法論として，構成論的に構築した仮想世界により「物語」的に捉えるという手法が有効なアプローチの一つであると考えられる．

シミュレーションでは，仮定や条件を変更し，再度実験を行うことが比較的容易であり，この特長を生かして，システムにおける因果関係を分析することができる．この操作性の高さは，口語的な表現になるが，「もし仮に～であったら…である」という，対象システムのそうありえた世界を再現することを容易にする．こうしたそうありえた世界は「可能世界」と呼ばれる（Lewis，1973a[23]）．可能世界の概念は，反事実条件法（counterfactual conditional）を用いることによって因果を明らかにすることを可能にする．「もし仮にCが生じなかったとすれば，Eは生じなかっただろう」ということから，「CがEの原因である」と結論付けることが可能となる（Lewis，1973b[24]）．確かに，反事実条件法は，通常，科学において用いられる「反証」（Popper，1961[25]）とは異なり，論理的に完全な因果の分析とはならない．しかし，これを用いることによって分析対象が大きく広げることが可能となる．ここに，この方法の有用性を見出すことが出来る．

参考文献

1) Simon, H. A. (1947) Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Process in Administrative Organization, Macmillan, New York.（松田武彦，高柳暁，二村敏子訳（1965）経営行動：経営組織における意思決定プロセスの研究，ダイヤモンド社，東京．）
2) Simon, H. A. (1976) From Substantive to Procedural Rationality, Method and Appraisal in Economics, S. J. Latsis (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp.129-148.
3) Simon, H. A. (1963) Economics and Psychology, Psychology: A Study of a Science, Vol.6, S. Koch (eds.), McGraw-Hill, New York, pp.685-723.
4) Waldrop, M. M. (1992) Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, Simon & Schuster, New York.（田中三彦，遠山峻征訳（1996）複雑系，新潮社，東京．）
5) Simon, H. A. (1996) The Sciences of the Artificial, 3rd ed., The MIT Press, Cambridge.（稲葉元吉・吉原英樹訳（1999）システムの科学，パーソナルメディア出版，東京．）
6) Wiener, N. (1948) Cybernetics, Wiley, New York.
7) von Bertalanffy, L. (1971) General System Theory: Foundation Development Applications, Allen Lane the Penguin Press, London.（長野敬，太田邦昌訳（1973）一般システム理論：その基礎・発展・応用，みみず書房，東京．）
8) Simon, H. A. (1962) Mechanism of Complexity: Hierarchy System, Proceedings of the American Philosophical Society, vol.106, pp.467-482.
9) Polanyi, M. (1966) The Tacit Dimension, Peter Smith, Gloucester, Massachusetts.（佐藤敬三訳（1980）暗黙知の次元：言語から非言語へ，紀伊国屋書店，東京．）
10) Klee, R. L. (1984) Micro-Determinism and concepts of Emergence, Philosophy of Science, Vol.51, pp.44-63.
11) Langton, C. G. (1989) Artificial Life: The Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, pp.1-47.
12) Holland, J. H. (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press.
13) Goldberg, D. G. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts.
14) 加藤恭義，光成友孝，築山洋（1998）セルオートマトン法：複雑系の自己組織化と超並列処理，森北出版，東京．
15) 中西俊男編著（1971）システム・シミュレーション，産業出版，東京．
16) 北村隆一（1996）交通需要予測の課題：次世代手法の構築に向けて，土木学会論文集、No.530/IV-30，pp17-30.
17) Mahmassani, H.S. & R. Jayakrishnan (1991) System Performance and User Response under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor, Transportation Research, vol.25A, pp.293-307.
18) Anderson, J. R. (1980) Cognitive Psychology and Its Implications, W. F. Freeman and Company, San Francisco.（富田達彦・増井透・川崎恵里子・岸学訳（1982）認知心理学概論，誠信書房．）
19) Epstein, J.M. and R. Axtell (1996) Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up, Brookings Institution Press, Washington D.C.
20) Shoham, Y. (1994) Multi-Agent Research in the Knobotics Group, In Castelfranchi & Werner (eds.), Artificial Social Systems, Springer, Berlin, pp.271-278.
21) Axelrod, R. (1997) The Complexity of Cooperation: Agent-Based Model of Cooperation and Collaboration, Princeton University Press, Princeton.
22) 金子邦彦，津田一郎（1996）複雑系のカオス的シナリオ，朝倉書店，東京．
23) Lewis, D. (1973a) Counterfactuals, Blackwell, Oxford.
24) Lewis, D. (1973b) Causation, Journal of Philosophy, vol.70, pp.556-567.
25) Popper, K. R. (1961) The Logic of Scientific Discovery, Basic Books, New York.