

動学モデルの役割 -過去, 現在, 将来を見通す道具として-*

Roles of Dynamic Model -As Tools for Viewing Past, Present and Future -*

上田孝行**, 赤松隆***, 小林潔司****

By Takayuki UEDA**, Takashi AKAMATSU*** and Kiyoshi KOBAYASHI****

1. はじめに

土木計画学において時間視野の重要性はどの研究対象に取り組むにしても強く認識されている。

「将来」の政策・計画を展望するだけでなく、歴史性に目を向けて「過去」を見通す必要に迫られることも多々ある。そして、それらを結ぶ「現在」も時間視野の中でこそ位置付けられるべきものである。しかしながら、そのための方法論は必ずしも標準化されておらず、それゆえに、時間視野での議論はしばしば根拠の無い無責任な主観の披露に終わりがちである。

時間視野を明示して問題を数理的に表現するのは、言うまでもなく、動学モデルである。社会経済を表現する動学モデルは多岐にわたり、それぞれに様々な展開を見せているが、土木計画学の場において動学モデルの役割と限界に関する根本的な議論は未だ十分ではない。

本セッションは土木計画学における動学モデルの今後の展開、特に、ただ単に将来を予測するという役割ことだけに留まらず、計画原論の一つとしての展開を議論したい。数名の話題提供者による問題提起を手がかりにして、広範な知見へと広げて行きたい。

上田孝行(東京大学)

進化論を踏まえた継承, 競合, 協調のモデル化

赤松隆(東北大学)

自律分散・適応進化的な社会基盤マネジメント

: 計算機科学とゲーム理論・経済学の邂逅を眺めつつ考える

小林潔司(京都大学)

歴史性を見通す道具としての動学モデル

以下では、各話題提供の概要を順に紹介する。

*キーワード: 動学モデル, 経済成長, 情報科学, 進化論

**正員, 工博, 東京大学大学院工学系研究科

社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

2. 進化論を踏まえた継承, 競合, 協調のモデル化

上田孝行(東京大学)

宇宙論を別にして、動学モデルとして最も長い時間視野を扱っている理論の一つは、生物学における進化論であろう。生物学内部に留まらず、進化論は一つの世界観として社会思想に影響を与えてきた歴史を持つ。大規模かつ複雑なシステムにおける自成的秩序の形成原理の一つとして常に関心を集めてきたと言える。

進化論の歴史は批判と論争の繰り返しでもあり、いくつもの多様な学説が生み出されてきた。学説が多様化したことの原因は、進化論が本来は展開されるべき時間の長さや現象の膨大さに比べて、観測できる時間はほんの一瞬とも言えるくらいに短く、しかも、観測可能な現象はほんの僅かではなかった。観測していない時間、観測していない事象の方がほとんどであると言うべきであろう。従って、各人が限られた観測事実からその背後にある壮大な一般理論を構築しようとすれば、そもそも観測事実が共有化されておらず、また、実際に観測できる時間の長さを越えた現象を対象にしているため、観測や実験による検証と理論の収斂というプロセスが成り立つのは容易ではない。だからこそ、観測された現象の解釈論から脱却するために、数理モデルを用いて理論の本質を明確にすることは進化の原理に関する共通理解を広げるという大きな意義がある。

現代では、分子生物学の発展、そして、その最大の成果と言えるゲノムの解析を経て生物学の有り様も大きく変わってきている。しかし、生命システムの要素に関する情報が膨大に蓄積されることが直ちにシステムの機能を解き明かすことであるとは限らない。むしろ、システムとしての原理に生命現象の特徴を求める分野が大きく発展を遂げており、システム生物学 (Systems Biology)^{1),2),3),4)}として注目を集めている。要素が組み合わさってネットワークとして機能すること、その機能が動的な現象として捉えられること^{5),6),7)}を生命システムの特徴する動きが見られる。

これまでの生物学分野における多くの数理モデルは、対象とする生命現象を個別的に解き明かすには多くの成功を収め、数理モデルの応用分野^{8),9),10),11),12)}として魅力的であった。そして、いわゆるソフトコンピューティ

ングの分野の発展に結びつき、様々な分野と相互作用を重ねてきた。しかし、時には、その相互作用が単に計算アルゴリズムを共有して数値解法の効率化という狭い範囲の興味や微分方程式の解の特性に集約される安定性の条件などのような分野によらず共通の理解が得やすい部分に限定されているように見えることがある。そのような部分に限定することなく、土木計画学が進化論を中心とする最近の生命論から学ぶべきものは多数あると期待している。秩序形成の一般理論として土木計画学とも広範な相互作用が成り立つことを望んでいる。

以上を前提として、まずは、ネットワークとしての表現されたシステムのダイナミクスという点からの研究方向を目指して行きたい。そして、一つの世代の中で閉じるような短期の政策課題に囚われることなく、複数世代を超えた時間視野の中で社会が継承して発展させていくものとしてインフラを捉え、その形成・変容をネットワークのダイナミクスとして表現すること^{13,14)}を当面の目標としたい。その中に登場するのは、技術や嗜好も変化する多数の個人、企業、政府であり。それらの中で形成・消滅されていく競合・協調のしくみもネットワークのダイナミクスとして捉えたい。自由競争による市場システムか、それとも、利他性やパターンリズムによる干渉・協働システムか、という二者択一的な政策論争を超えて、ネットワークダイナミクスの中で頑健に持続可能な現象としてインフラを実現する諸政策を捉えたい。そのような理論が出来上がれば、まさに持続的可能な将来を見通すための一つの手がかりを手に入れることができると期待している。

3. 自律分散・適応進化型の社会基盤マネジメント: 計算機科学とゲーム理論・経済学の邂逅を眺めつつ考える

赤松隆(東北大学)

20世紀末から10年ほどの間に、ゲーム理論・経済学と情報科学(広義の"Computer Science")の急速な融合が生じつつある。例えば、(1)情報の経済学や制度設計理論(eg.オークション理論)に計算機科学(eg.離散数学・計算理論・アルゴリズム論)の理論・発想を導入した"Computational Mechanism Design"; (2)ゲーム理論・経済学、数理生態学分野の進化・学習ゲーム理論に計算機科学分野(eg.機械学習、AI、数理統計学、計算・アルゴリズム論)の発想・理論を導入した"Multi-Agent Learning Theory"; (3)計算機・通信ネットワーク・システムの資源管理問題に対するゲーム理論(eg.ポテンシャル・ゲーム)や交通ネットワーク理論(eg. Wardrop均衡)の自律分散的な発想

の導入、等々、枚挙に暇がないほどである。そして、古典的な経済学・ゲーム論では"black box"であった概念(eg. "効率的な市場均衡状態")を実世界で構成的に具現化するためのマイクロ・メカニズム理論、及び、ICTの進歩を活用した実装技術が、理工系研究者(eg. IEEE, ACM, INFORMS等の工学系研究者、応用数学者、物理学者)を巻き込んで、急速に発展している。

このような流れが生じている背景の一つは、動的かつ多様に変化する環境下で、多数の要素・主体から成る大規模システムを適切に運営するには、中央集権的な計画・管理法では無理があり、自律分散・適応進化型の方法(eg. マーケット・メカニズム)が必要とされることにある。本報告では、このような研究の発想・方法論を土木計画学分野(広義の社会的インフラストラクチャ・マネジメント問題)へ導入することの可能性・必要性および具体的な研究機会について議論する。

4. 歴史性を見通す道具としての動学モデル

小林潔司(京都大学)

経済学や天文学と同様に土木計画学の分野では、科学や物理学の特徴であるような制御された完全な実験を実施することは不可能である。近年、社会実験も実施されるようになってきたが、不完全な部分的な実験に留まらざるを得ない。土木計画学では、完全な実験の代わりに、観測の蓄積と理論の深化の相互作用を通じて学問の発展を支えていかざるを得ない。しかし、国土政策、都市・地域政策は、国土、都市・地域の成長と発展の経路に影響を与え、望ましい国土、都市・地域を再創造することが可能である。よりよい国土、都市・地域政策には、国土、都市・地域の成長と発展に関する正しい理解が必要である。

1958年、チャールズ・バベッジの勧告に従い、ニコラス・カルドアは資本蓄積コンファレンスの講演の冒頭で、経済理論家たる者は理論が説明することを求められている事実をまとめて「定型化された事実(stylized facts)」として示すことから出発すべきだと主張した¹⁵⁾。カルドアは国民経済の成長が、以下に示すような6つの「定型化された事実」に集約されるとしている。

【事実1】 1人当たりの実質産出量は、かなりの長期を見れば、ほぼ恒常の率で成長している。

【事実2】 実質資本ストックも恒常の率で成長しており、その成長率は労働投入量の成長率より大きい。

【事実3】 実質産出量と資本ストックの成長率はほぼ同一であり、資本・産出比率は規則的な趨勢をもたない。

【事実4】 資本収益率は概ね一定である

【事実5】 1人当たりの産出量の上昇率は、国によって大幅に異なる。

【事実6】 利潤の配分率が大きい経済ほど、投資が産出量に占める割合が大きい。

以上の6つの「定型化された事実」が、真に事実であるかどうかに関しては、若干の疑念の余地がないわけではない。しかし、事実であろうとなかろうと、多くの新古典派的経済成長理論は、「定型化された事実」を説明することにしのぎを削ってきた。このうち、最初の3つ（あるいは4つ）通りに成長している経済は、今日では「恒常状態」にあるといわれる。新古典派成長理論は、多くの場合そのような恒常状態の性質を分析したり、あるいは過渡的な推移過程を分析することに専念している。

近年では、内生的経済成長理論の発展により、「定型化された事実」も、多くの修正版が示されている。例えば、Jones は、内生的経済成長理論を体系化するにあたり、以下の7つの「定型化された事実」を掲げている¹⁸。

【事実1】 各国の経済の間で1人当たり所得には大きな違いがある。最も貧困な国の1人当たりの所得は、最も豊かな国に比べると5%以下でしかない。

【事実2】 経済成長率は国によってかなり大きく異なる。

【事実3】 成長率は長期的に一定であるとは限らない。

【事実4】 世界における1人当たり所得の分布に占める1国の地域は不変ではない。

【事実5】 米国では、過去100年を通じて、1) 実質資本収益率は、上昇・下降のトレンドを持たない。2) 資本分配率、労働分配率は、いずれの傾向も示さない。3) 1人当たりの産出量の成長率はプラスで、時間を通じて相対的に一定である。

【事実6】 産出量の成長と国際貿易量の成長との間には密接な相関がある。

【事実7】 熟練労働者、未熟労働者ともに、貧しい国および地域から豊かな国および地域へ移住する傾向がある。

経済成長理論では、技術進歩こそ経済成長のエンジンである。新しい内生的経済成長理論では、技術進歩は「天国からの贈り物 (manna from heaven)」としてではなく、新しいアイデアが生み出す社会的利益を利潤の形でわがものにしようとする個人が努力する過程で生じると考える。ローマー¹⁷が指摘したように、アイデアが非競争的であるために生産は規模に関して収穫逓増になる。内生的経済成長理論が表現しようとした世界は、知的所有権確立以後の技術発展である。過去100年間、世界経済は人口、技術、そして1人当たりの所得において歴史的にかつて見られなかった持続的経済成長を実現した¹⁸。内生的経済成長論の世界では、結局のところ、世界の技術の成長率が人口の増加率に依存していることが明

らかになった。この場合、投資率の増加や研究開発従事者比率などの政策は水準効果を生み出すが長期的成長効果をもたない。一時的に成長率を高めるが、一時的に成長率が高まるに過ぎない。内生的経済成長理論においては、投資率と技術習得のために個人が費やす時間は外生的に与えられている。「ある国が他国よりも多くの投資が行うのはなぜか?」、「ある国の人々が技術習得のためにより多くの時間を費やすのはなぜか?」このような問題に対して、解答の大筋を示す公認の (canonical) モデルは、筆者の知る限り存在していない。

カルドアが提唱した「定型化された事実」は、経済成長に関する歴史的観測結果を集約化したものであり、経済成長理論研究の羅針盤となってきた。かつて、Heisenberg は、不確定性理論を構築するうえで、「事実が確認されていないために起こる理論的な誤りは、真のデータについての推論が妥当でないことから起こる誤りよりも、実際数が多く、しかもその影響は永続的である。」と述べた¹⁹。しかし、それと同時に、「観察可能な量だけに頼って理論をうちたてようとするのは全く間違っている。何を観察できるかを決めるのが理論というものだ」とも指摘している。結局のところ、「定型化された事実」と「理論的な深化」の間には相互作用があり、互いに影響を及ぼしながら、前進を続けるというほかに、道はない。ここで、歴史的過程に関する「定型化された事実」を示すことの効用は、理論的モデルが説明を試みようとする定型化された事実を批判することにより、理論モデルを棄却しようとする点にあるのではない。Solow が指摘するように、もともとそれほど単純な記述が、事実とぴったりと適合するはずはない²⁰。しかし、理論モデルが観察されるものとまったく何の関係もないのであれば、定型化された事実とこだわる理論モデルは、価値がないと批判されても仕方がないことは確かである。まさに、「定型化された事実」は、「事実が確認されていないために起こる理論的な誤り」を防ぐために不可欠である。それと同時に、理論的研究と実証研究の発展により「定型化された事実」の再検証が積み重ねられなければならない。

近年、新経済地理学²¹の分野をはじめとして、国土、都市・地域の成長発展に関する動的モデルの開発が進展しつつある。残念ながら、国土、都市・地域の発展過程に関する「定型化された事実」に関して、学問的合意は形成されていない。「定型化された事実」を踏まえ、知的遊戯としか思えない理論モデルの再生産が続いているように思える。国土政策、都市・地域政策形成においても、「定型化された事実」の定式化と検証に関する真剣な議論を出発点にすべきであろう。羅針盤をもたない理論研究、実証研究、政策的議論は、いずれも不毛に終わる危険性がある。

5. おわりに

動学モデルは土木計画学の中で重要度が最も強く認識されながらも、必ずしも多くの研究者がそれを手がけているわけではない。その理論に取り組めば、数学的な取り扱いが容易ではなく、また、実証するにも多くのデータ上の困難があることは直ちにわかる。そのため、躊躇する者が多いのは仕方がない。しかし、今日の多くの政策課題が過去において長期的な視点からの議論が十分でなかったことに起因しており、これから将来に向けても長期で覚悟を決めて取り組んでいかなければならないことは明らかである。インフラはまさにそのような政策課題の一つである。土木計画学において動学モデル、とりわけ、長期の視点からのそれに関心が向けば幸いである。セッションでの活発な意見交換を期待したい。

参考文献

- 1)北野宏明, 竹内薫著, したたかな生命進化・生存のカギを握るロバストネスとはなにか, ダイヤモンド社, 2007
- 2)北野宏明著, システムバイオロジー-生命をシステムとして理解する-, 秀潤社, 2001
- 3)北野宏明編, システムバイオロジーの展開—生物学の新しいアプローチ-, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2001
- 4)Kitano, H. eds., Foundations of Systems Biology, MIT Press, 2001
- 5)金子邦彦著, 生命とは何か複雑系生命論序説, 東京大学出版会, 2003
- 6)金子勝, 児玉龍彦著, 逆システム学-市場と生命のしくみを解き明かす-, 岩波新書, 2004
- 7)伏見謙, 西垣功一編著, 進化・情報・かたち-生命知のパーспекティブ-, 培風館, 2006
- 8)徳永幸彦著, 絵でわかる進化論, 講談社サイエンティフィック, 2001
- 9)酒井聡樹, 高田壮則, 近雅博著, 生き物の進化ゲーム, 進化生態学最前線:生物の不思議を解く-, 共立出版, 1999
- 10)巖佐庸著, 数理生物学入門-生物社会のダイナミクスを探る-, 共立出版, 1990
- 11)巖佐庸編, 数理生態学, 共立出版, 1997
- 12)巖佐庸著, 生命の数理, 共立出版, 2008
- 13)Nowark, M.A. 著, 竹内康博・佐藤一憲・巖佐庸・中岡慎治監訳, 進化のダイナミクス-生命の謎を解き明かす方程式-, 共立出版, 2008
- 14)福岡伸一, 生物と無生物のあいだ, 講談社現代新書,

2007

- 15) Kaldor, N.: Capital accumulation and economic growth, in Lutz, F.A. and Hague, D.C. (eds.) :*The Theory of Capital*, St. Martins, 1961.
- 16) Jones, C.I.: *Introduction to Economic Growth*, W.W.Norton & Company, Inc., 1998.
- 17) Romer, P.M. : Increasing returns and long-run growth, *Journal of Political economy*, Vol.94, pp.500-521, 1986.
- 18) North, D.: *Structure and Change in Economic History*, Norton, 1981.
- 19) Heisenberg, W.: *Physics and Beyond*, Harper & Row, 1971.
- 20) Solow, R.M.: A contribution to the theory of economic growth, *Quarterly Journal of Economics*, Vol.70, pp.65-94, 1956.
- 21) Fujita, M., Krugman, P. and Venables, A.J.: *The Spatial Economy*, MIT Press, 1999.