

システムダイナミクス研究の今日的課題

小林 秀 徳

第1節 システムダイナミクス方法論

[1] SD 研究の現状

Jay W. Forrester が *Harvard Business Review* にインダストリアルダイナミクスと名付けられた新しい分析アプローチの考え方を発表してから40年が経過した。この研究領域は1970年代以降もっぱらシステムダイナミクスと呼ばれるようになったが、適用分野に対する限定の解除は、このアプローチが世界中で数多くの応用研究を促し、政策分析の一手法として、現実の意思決定問題への支援助力を提供し得た結果であったろう。

わが国においては、オペレーションズリサーチの導入に従ってかなり早い時期から研究が開始され、コンピュータの普及にともなって多くの大企業の調査・企画・戦略部門で現実に適用された60年代後半においては、一種の社会現象の観を呈した。この普及熱は70年代初頭のワールドダイナミクスモデルによる成長の限界に関する予測シミュレーションによってピークに達したが、その後、オイルショックとこれに続く世界的経済停滞の時期において急速に減退していったのである。

筆者がシステムダイナミクスの研究を開始した1972年には、アーバンダイナミクスの影響を受けて地域問題へのSDの適用がいくつかの自治体で試みられていたが、企業においては初期MISの不調にともない、コンピュータシミュレーションによる経営意思決定の改善という考え方そのも

のに対する懐疑が蔓延していたようである。

システムダイナミクスの最大のメリットは、非専門家に対してモデルの全体像を細部に致るまで明瞭に伝達することができるという点にあり、これが学際的協働を任意の問題に対して結集する有力なツールを提供する所以である。しかしこのメリットが実は最大の弱点ともなっている。すなわち、アプローチが単純で手法的な深みに欠け、システムダイナミシストは専門研究者として底が浅いのではないかという印象を与えてしまうのである。

システムダイナミクスの第二のメリットは、フィードバックをもつ複雑なシステムの研究ならおよそどんな問題にも適用できて、比較的短い時間でなんらかの成果を上げ得るという点である。しかしこのメリットはその領域専属の研究者の職域を脅かす。特にアメリカにおいては新古典派エコノミストからSDは「モデリングに名を借りた無法」であると罵られることもしばしばあるという¹⁾。

システムダイナミクスの第三のメリットは、基礎的にハードなデータが欠けているような構成要素間の関係に対してもフォーマルな定式を与え、その関係が引き起こすシステム効果をテストする機会を提供するものであるという点である。しかしこの点をとらえて「データなき計測」と揶揄するポジティヴィストもいる²⁾。

このようにシステムダイナミクスのメリットとその弱点は表裏をなしており、伝統的な社会科学と工学の賞揚の枠組みの中で、研究者にとってあまり魅力のあるアプローチではないように思われてきたのもまた事実である。

こうした方法論的状况の下で、社会的な普及熱が去ってしまったためにいきおいシステムダイナミクス研究は下火になっていったように見えるが、実は、本格的な研究はブームが去ってから始るもののようで、地道な研究を積み重ね約10年を経て、アプローチの改善と多くの若い頭脳がこの

分野への結集が成り、1983年の System Dynamics Society の結成、1985年の *System Dynamics Review* の創刊となって結実した事実を特筆しなければならない。

このシステムダイナミクスの第二世代の特色は、それ以前とは異なるコンピュータの活用方法に見出すことができる。すなわち、従来のラインプリンタ出力では不可能であったリミットサイクルやストレンジアトラクタの画像処理を武器として、非線型の3-レベル以上のダイナモ方程式モデルの長期（200～500年）にわたるシミュレーションが導き出す反直感的システム変動（これは従来からのシステムダイナミクスの研究対象であったが）を自由自在に観察する新しい研究スタイル＝それは複雑なシステムの研究に必要な想像力を刺激し、定式化されたシステムに対する高度な理解と、対象となるシステムの将来に対する深い洞察を与えてくれる＝を生み出してきた。この状況はパソコンやワークステーションといった小型のコンピュータの大容量化が切り開いた地平であるが、システムダイナミシストはそれを逸早く研究に生かしたものと見える。

筆者は1980年以来ソードの8ビットパソコン（当時はマイコンといったが）用に100本までのダイナモ方程式をコンパイルしてシミュレーション結果のプロットをCRTに出力させるコンパイラ/シミュレータを試作し、1983年にはNECの88用のダイナモを完成させていたが、その後のハードウェアの発達が目覚しく、IBM用のProfessional DYNAMO、Mac用のStella、FMR80用のDYNAMOPⅢは新世代システムダイナミシストの研究に大いに裨益している。

システムダイナミクスは、生れた当初も現在も、次の四つの領域における発展を母胎としてきた。すなわち、

- (1) コンピュータ・テクノロジー
- (2) コンピュータ・シミュレーションの実践
- (3) 戦略的意思決定についての研究

(4) 複雑なシステムにおけるフィードバックの役割と因果ループについての理解

システムダイナミクスは、しかし、これらを融合して一つの統合領域を形成しようとするものではない。むしろこれらを背景として、利用し得るものは大いに活用 (exploit) して、複雑なシステムの変動パターンを生み出す内部構造を研究することを目的としている。それは、ストックとフローのネットワーク、情報フィードバックと遅れ、因果ループの重層化、支配的ループのシフトパターンといったものによって、内部構造の解明をはかろうとすると、誰であれ踏襲する自然なアプローチに実施可能な技術を装備したものであると言い得る。

フォーマルなモデルと飛躍的に増大した計算能力との結合が、理論やメンタルモデルからインプリケーションを抜き出す人間の能力を増大させ、複雑なシステムについての直感的理解を改善してゆく具体的で正確な手続きを用意する。

新しい技術と古い知恵との融合、フォーマルなモデルと概念構成との融合、理論科学と応用領域の融合、純技術的取り扱いと政策志向的検討との融合、等々が随所において達成されるような多元的方法論の確立を目指すものである。

[2] SD と経済学

社会的な複雑なシステムの変動を検討することによる内部構造の理解は、経済学が元来とりあつかうべき問題領域であったように思われる。

経済学の自らの定義が「稀少資源の効率的配分問題 (だけ) を研究する」というものであるなら、システムダイナミクスと経済学 (neoclassical economics) とは多分関わりをもたない。しかし、「経済学は経済の構造—変動—成果を一般的相互依存性ないし複合的因果作用の体系として見る、全体論的・進化論的見解」を中心に据えているとすれば、この主語をシステ

ムダイナミクスと置き換えても全く正しい³⁾。問題は、この見解が経済学エンパイアにおいてマイノリティーに属する制度学派のものであるという点である。制度学派経済学は数理的に展開することが難しいために、フォーマルなモデルとそこから演繹される厳密に証明できる仮説（説明・予測）を理論化していない。

本来の論理実証主義に基づく経済学のあるべき姿は：

- (1) 「原理的な法則性」の証明とそれに「先行する諸条件」の成立の検証に基づいて理論命題を「現実的予測」として提出する過程を通じて現実分析をなすこと
- (2) 「現実的予測」と現実分析の過程から得られる「採集された知識」との乖離を説明する理論命題を新たな仮説として「原理的な法則性」を証明し「先行する諸条件」の成立を検証する過程に返すこと

という二方向の演繹的推論から成るはずである。後者は「採集された知識」を敷衍するものではなく、「現実的予測」との乖離を「説明」する理論命題を作成するものであるという意味において帰納とは異なる。

もしこの方法論的把握が正しければ、システムダイナミクスと経済学とは密接に正当な関連性をもつ。システムダイナミクスは経済学研究のツールの一部を成し、経済学はシステムダイナミクス研究のフィールドの一つになる。しかし現状は、システムダイナミクスと経済学研究とはこのような良好な関係を発展させているとは言い難い⁴⁾。

20世紀も終わりに近づいてから、経済動学の研究は装いを新たにする方向での可能性を拓いた。経済変動が、群起する技術革新によって常に新しい均衡水準へ向けての調整をなそうとする企業行動の集計化されたものであるとするなら、わずかの非線型性の導入によって、不動点のもつ安定性を保証するパラメータ空間上の領域は複雑な分岐をもったものに変る。パラメータのわずかな変化に対して、もはや新しい均衡へと下からS字カーブで調整してゆく変動パターンを期待することはできなくなっている。

競争均衡が市場をクリアして落ち着く均衡は安定な不動点でなければならぬが、現実の市場均衡は決して同時方程式の解として瞬時に決定されるものではなく、逐次決定機構をもつ個々の参加者の調整的意思決定の相互干渉によって、最終的にそこに収斂するという意味の均衡水準なのであって、一般均衡を現実に通導保証は、一般的には、完全競争性のみでは与えられない。本来動態的な現象を静学的にとりあつかうことのメリットは、それが不動点を実際に導き出す計算手続きであるという以上のものではない。

経済学における均衡概念の一般化は、沈点における静学的均衡から振動を常態とするリミットサイクルへ、さらにカオスの変動を含むアトラクタへと進むことを余儀なくされ、従来の均衡点もその意味のアトラクタの特殊例として展開されるべき新しい経済分析のスタイルが模索されている。

こうした理論的フレームワークに対する再検討が期待されている時期における制度学派経済学の復権は決して偶然の産物ではない。フォーマルモデリングにより分析的にインプリケーションを抽出する道具をシステムダイナミクスが制度学派経済学に提供することによる新しい経済学の試みはすでに始められていると言っても良い。

〈株式市場の例〉

株式市場はよくできた市場モデルに近い構造をもっている。1日のうちに何度も取り引きが有り、株式に関する情報はリアルタイムに参加者に伝わる。取得した株式をすぐに売り払うこともできる（売手と買手に対称性がある）。取り引きコストは（少なくとも市場参加者にとっては）無視できるぐらい小さい。

ある日の株価（日経平均と思えば良い）が P 円であったとしよう。 T 日後に決済される先物価格が F 円であるとき、もし $P > F$ であるなら現物を1単位売って先物を1単位買う。決済日の株価＝先物清算指数が Q 円になっ

たとして、 T 日前と反対の取り引きを行うとする。すなわち現物を Q 円で買戻し、先物を Q 円で売り戻す。このとき、

$$\text{現物の取り引きによる利益} : P - Q \quad \text{①}$$

$$\text{先物の取り引きによる利益} : Q - F \quad \text{②}$$

$$\text{総利益①+②} : P - F$$

最初の日の取り引きのために払い込まなければならなかった金額がいくらであったにせよ、それに T 日分の金利をのせた金額（資本コスト）が $P - F$ よりも小さければ、以上の取り引きは決済日の株価 Q 円とは無関係に初日において確定的な利益をもたらしたことになる。

このような無リスク利益機会を利用して鞘を抜く取り引きを裁定という。

新古典派の予測は、もしこのようなことがあれば最初の日に誰もが先を争って先物を買って現物を売るはずであるから先物価格は上がり現物価格は下がり瞬時にして $P > F$ の状態は解消するだろうというものである。市場が効率的であれば無リスク利益機会は存続し得ない。

しかし現実には、株価が加熱ぎみに高い水準にあると皆が思っているとき、先物価格はいわば T 日後の現物価格の予想であるから、初日の裁定による大量の現物売りが株価を下落させると、低い先物価格が一種の自己成就的予言となるのである。この自己成就性は次のようなポジティブ・フィードバックによってもたらされる。すなわち：

裁定による大量の現物売りが株価を急激に下落させ、この下落がある幅を超えると下落した現物に一齐に買いが入り、リスクヘッジのためにその分先物が大量に売られる。この先物売りが先物価格をさらに低下させ、裁定による現物売りを一層増大させ、現物価格がさらに低下し、同じループを何度もたどって、株価は短い時間に急激に低下してしまう。

裁定者の初日における現物売りを買った人、先物買いに対し売りに立った人はその後の株価の動きによって利益が出る場合も損失が出る場合もある。しかし裁定者が利益を確定した分だけ期待値における損失を被ったこ

とは確実である。予言の自己成就性のもとでは、先物売りよりも現物買いの方がより期待値を下げているはずで、このことはますます現物価格の崩壊に拍車をかける。

パニック的株価の下落をもたらすこの構造には普遍性があるようで、ニューヨークでも東京でも同じように推移し、新たな現実経験となったばかりである。このように、裁定がもたらす現物価格と先物価格への衝撃は対称的でもなければ線型でもなく、「瞬間的ネガティブ・フィードバック信仰」に基づく均衡理論的道具立てでは有効に分析することができない。

株式市場は人為的な構造物であるから、均衡理論にせよ何にせよ、経済学の処方するところにしたがって制度化することができる。裁定者が無リスクで手に入れた莫大な利益は、損失を負った参加者の嫌気をさそい以後の出来高を長期にわたって低迷させ、相場崩壊による市場の確定損失となって顕われている。合理的な制度を処方する理論は持続可能な処方箋を与えるものでなければならないとすれば、新古典派のそれに替る別の道具立てが要ることは明かとなっている。

[3] SD と経営学

新古典派的均衡の概念があまりフルーツフルでないことを長年にわたって主張し続けてきた研究領域に経営学がある。

企業経営者は決して利益最大化をしていないにもかかわらず、その事を仮定した上で成立する均衡理論の予測が正しいのであれば、モデルは同じ予測を与えるならシンプルであるにこしたことはないから、均衡理論は前提を変更した上で書き直される必要をもたない、という新古典派のテーゼはよく知られている⁵⁾。これに対して経営学は経済学の主流を争うことを止め、独自の企業理論を展開する道を選んだ。組織研究の豊かなフィールドが開かれていたからであろう⁶⁾。

SD がインダストリアルダイナミクスと呼ばれていた時代の応用研究は、

間違いなく経営学領域のものである。

多段階的な情報の流れが遅れの重層化構造をもたらし、外生的攪乱に対してシステム変動を拡大するというプロセスが研究された。与えられた目標水準に対して評価変数を調節する意思決定はそれ自体がシステムに遅れを付け加える。パイプライン上に溜まる未実現調整部分の管理に対するマネジメント努力の投入要求は、企業成長に対して抑圧的に働き、企業規模は市場が無限の大きさをもっているにもかかわらず無制限に大きくはなれない。成長志向をもつ企業が労働資源の獲得において積極的な戦略をとる場合にはより成長過程が不安定なものとなる……インダストリアルダイナミクスによって始めてフォーマルな検討にさらされた経営学上の問題は数多い。初期のSDの適用においては、システム変動の拡大要因を探り、成長の安定化方策を求める政策シミュレーションの結果により、現実の経営システムに対する改善提言を導き出すという原則的なスタイルがとられている。

Forrester 自身も、このアプローチは中小規模の企業経営者が自らの手で企業モデルを作成しシミュレーションすることによって、最も威力を発揮するものと考えていた。いわばマネジメントツールとして有用なものであるが、その有用性は、経営者が自らのメンタルモデルを陽表化してコンピュータ・シミュレーションにより手にした予測と、暗黙のメンタルモデルの使用による心的シミュレーションの結果とはしばしば相容れないものであり、こうしたシステムの反直感的変動の存在を知ることによって組織に対する理解を増進するという、経営者の学習プロセスを通して発揮されるものであって、経営者のマネジメント能力に従属した、管理用具としての有用性とは異なっている。

しかし経営学の関心が管理技法から組織における人間の行動へと移ってゆくにつれて、経営者の学習のためのSDによるコンサルティングから、学習する組織の行動に関する実証的研究における命題作成ツールへとSDアプローチ利用研究の関心も移行してきている。

組織が環境から受け取るさまざまな刺激に対して、組織の内部状態は変動を余儀なくされる。しかし外からの攪乱が何もなかったとしても、組織はそれ自らの変動を作り出し、内部状態を大きく別のものに变革してゆく動因をもっている。この永続する変動を生み出すストック＝フロー・ネットワークのパターンを構造的に明らかにしようとする関心はシステムダイナミクス・スクールの大きなパートに成長しつつある。

経済学の場合とは対照的に、システムダイナミクスと経営学とは密接に正当な関連性を持ち、システムダイナミクスは経営学研究のツールの一部を形成し、経営学はシステムダイナミクス研究のフィールドの一つになっている。この関係は組織理論の発展につれてますます濃厚なものとなってゆくであろう。

[4] SD と政策科学

政策科学は、現実の政策改善のための合理的分析を研究実態としつつ政策関連知識の形成を目指す学問領域である。それはマネジメントサイエンスに代表される意思決定科学の進歩と社会科学諸領域における実証命題の数量的取り扱いの普及を背景として、情況依存的規範論を政策問題の解決という観点から展開する。

政策問題は必ずしも相互に相容れない価値判断を含み、市場による、あるいは組織による合理的統合化メカニズムを期待し得ない集団的意思決定の領域で、政治的利益代弁過程に対し情報活用性と分析的合理性を持ち込むことによって、政策決定そのものを改善しようとする第三の社会的相互作用によってのみよく解決され得る。

このような介入を役割とする政策科学者は、全体関連的な情況把握と、問題志向的な分析視覚と、実行可能でスピーディな手法装備とをもたなければならない。

システムダイナミクスの①複雑なシステムを相互依存的因果関連の多重

ループ構造として取り扱うモデリング，②シミュレーションによりパラメータの変化に対するシステム変動の感度をテストする政策分析，③ダイナモその他のソフトウェアの開発とその研究・教育における一体的使用，は政策科学者に対する3つの要求と高度に適合的である。

代替的価値判断に則して同じ状況を異なるモデルとして陽表化すること，同じモデルを使って代替的価値判断に従うパラメータ領域でのシミュレーションを実施すること，モデルの部分を代替的価値判断で置き換えて自由に改訂すること，等々を政策決定者への伝達におけるロスを伴わずに実施することができるというシステムダイナミクスの利点は，政策科学の実現にとって大きな意味を持っている。

パーソナルコンピュータの一般への普及と，システムダイナミクス・アプローチの政策分析家への普及は，現実に進展しつつある過程であり，政策科学の発展を促すものと考えられる。政策科学の発展はSDに対する新しい要求を生み出し，そのことがSDアプローチの革新に対する誘因となり，政策分析支援技術を高度化してゆけば，政策科学はそこからさらなる発展の契機を得ることができる。

このようなポジティブ・フィードバックを現実に自律的運動として生み出すには研究資源がある臨界に達する必要がある，そのための活動が精力的に押し進められている。

第2節 SDと決定論的カオス

システムダイナミクス第二世代の特徴をよく伝えるものとして決定論的カオス研究を挙げることができる。本節では筆者の従来のモデリングスタイルに則して，この新しい領域の一端を紹介しよう。

[1] 企業の資本調達モデル

企業は生産設備を用いて製品を生産しこれを売る。売上となって流入す

る資金は一旦は手元に溜まるが生産に要する費用、借入金に対する金利の支払いおよび借入金の返済となって流れ出してゆく。この溜まり（現金預金残高）を図1では手元流動性と書いた長方形で示している。

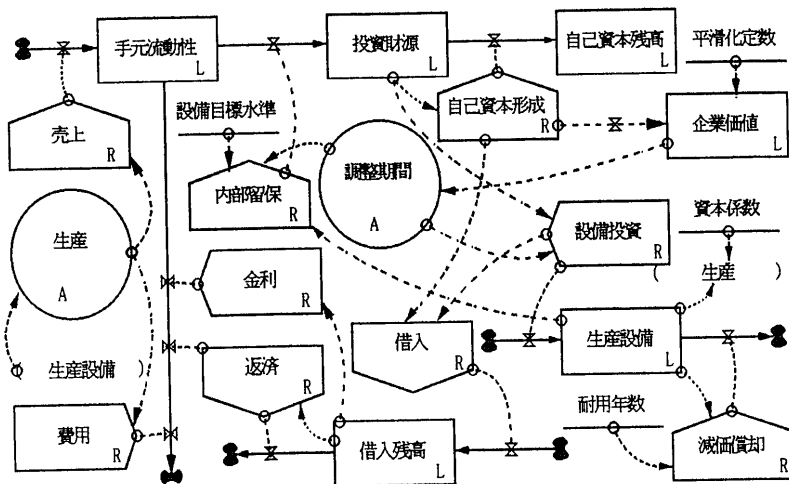


図1 資本調達モデルのフローダイアグラム

生産設備は有限の寿命をもったコンポーネントの集合であるから時とともに減耗して除却されてゆく。したがってある水準の売上と費用とを維持するためには常に設備投資をして除却された設備の更新を計ってゆかなくてはならない。あるいは新たな利益目標に対して増大された設備の目標水準に向けて新規設備投資を計画することになる。

この設備の購入には資金が必要であるから、手元流動性の一部を内部留保することにより調達した資金（投資財源）を用いてこれを賄おうとする。この留保された資金は自己資本形成となって自己資本残高に付け加えられる。

以上を方程式に表わせれば次のようになる。

$$\text{期末流動性残高} = \text{期首流動性残高} + \text{当期売上} - \text{当期費用}$$

－当期金利－当期返済－当期内部留保

期末投資財源＝期首投資財源＋当期内部留保－当期自己資本形成

期末自己資本残高＝期首自己資本残高＋当期自己資本形成

期末生産設備＝期首生産設備＋当期設備投資－当期減価償却

以上で期首・期末という時点に対応した接頭詞を付してある変量はストックであり、当期という期間に対応した接頭詞を付してある変量はフローである。ストック量は時点に対応した同じ変数の水準であるという意味で、期首時点をJと書き、期末時点をKと書いて区別することにより、期首生産設備を生産設備.J、期末生産設備を生産設備.Kのように表わすことができる。これに対してフローはその時間当りのボリュームが同じであつても期間の長さ依存して値が変わってしまうので、このことを明示的に示すために当期というタイミングをJKで表わし期間の長さをDTで表わして次のように書く。

生産設備.K＝生産設備.J＋DT×(設備投資.JK－減価償却.JK)

したがって設備投資や減価償却のようなフロー量は(円/年)のような次元をもつ。期間の長さを3ヵ月とすれば、DT＝0.25で、生産設備に付け加えられるこの当期の設備投資は、設備投資(円/年)の4分の1(0.25年倍)ということになる。このような年率フローそのものの値は一般にDTごとに変化してゆく。この約束により上記の方程式は次のようになる。

手元流動性.K＝手元流動性.J＋DT×(売上.JK－費用.JK－金利.JK
－返済.JK－内部留保.JK)

投資財源.K＝投資財源.J＋DT×(内部留保.JK－自己資本形成.JK)

自己資本残高.K＝自己資本残高.J＋DT×自己資本形成.JK

この表記法に従えば

当期における年当り減価償却＝期首生産設備/耐用年数

は

減価償却.JK＝生産設備.J/耐用年数

と書き表されるが、ダイナモではこれを次のように書く。

$$\text{減価償却} \cdot KL = \text{生産設備} \cdot K / \text{耐用年数}$$

すなわち、次期末時点を新たにLと名付けることにより、期末時点から見た当期のタイミングをJKと呼んだのに対し、期首時点から見た当期をKLと呼ぶことにしたものである。計算上の意味は少しも変わっていないが、フローの決定は期首時点に立って未来へ向けてする意思決定の結果であると考えることがこの規約の精神にはある。これにより

$$\text{自己資本形成} \cdot KL = \text{投資財源} \cdot K$$

となる。ここまでは意思決定といっても半ば受動的なものであったが、次の設備投資はまさしく経営者の意思決定に関わる事項であり、普通、資金調達に関わる遅れと、生産設備の調整に関わる遅れとを伴うと考えられる。経営者は利益計画に基づき望ましい設備目標水準を定め、これと現有の生産設備との乖離を調節すべく資金調達を行う。

$$\text{内部留保} \cdot KL = (\text{設備目標水準} - \text{生産設備} \cdot K) / \text{調整期間} \cdot K$$

$$\text{設備投資} \cdot KL = \text{投資財源} \cdot K / \text{調整期間} \cdot K$$

さて、企業の価値は未来永劫にわたってもたらされる年々の利益の割引現在価値と考えられる。年々の利益予想を長期にわたる自己資本形成の平均値で代用するものとすれば、これを割引率で除したものが企業価値の指標となる。簡単化のために、割引率を一定として、ここでは企業価値は自己資本形成の指数平滑値（と比例的なもの）と考えることとする。すなわち、

$$\text{企業価値} \cdot K = \text{企業価値} \cdot J + DT \times (\text{自己資本形成} \cdot JK - \text{企業価値} \cdot J) \\ / \text{平滑化定数}$$

と書き表す。

企業価値は担保力、株価、信用力といったものの指標にはかならないから、生産設備の調整期間である内部留保と設備投資の遅れは、企業価値が大きいほど短く、小さいほど長いと考えられる。そこで次のような非線型

の関係を考える。

$$\text{調整期間} \cdot K = \text{定数} 1 + \text{定数} 2 / \text{企業価値} \cdot K$$

これは図2のような（企業価値→0に対して調整期間→∞）、（企業価値→∞に対して調整期間→最小限遅れ）、という関係を表している。

このようにして遅れて実現する設備投資が自己資本形成よりも大きな値になった場合にはちょうどその額だけ借入が発生する。逆に自己資本形成が設備投資を上回る場合にはその分だけ余計に借入を返済するものとする。

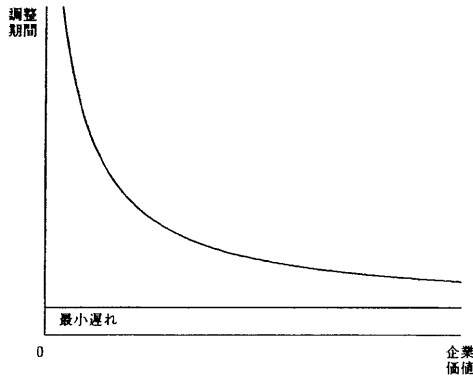


図2 企業価値と調整期間

$$\text{借入残高} \cdot K = \text{借入残高} \cdot J + DT \times (\text{設備投資} \cdot JK - \text{自己資本形成} \cdot JK - \text{返済} \cdot JK)$$

$$\text{返済} \cdot KL = \text{借入残高} \cdot K / \text{返済期間}$$

$$\text{金利} \cdot KL = \text{借入残高} \cdot K \times \text{利率}$$

売上マイナス費用は生産高と比例的であるとして手元流動性は次のように簡略化する。

$$\text{流動性} \cdot K = \text{流動性} \cdot J + DT \times (\text{営業損益} \cdot JK - \text{金利} \cdot JK - \text{返済} \cdot JK - \text{内部留保} \cdot JK)$$

$$\text{営業損益} \cdot KL = \text{利益係数} \times \text{生産} \cdot K$$

$$\text{生産} \cdot K = \text{生産設備} \cdot K / \text{資本係数}$$

以上で図1のすべての変数に方程式が与えられた。このように変数名を漢字で表記するとモデルの説明が簡潔で要を得たものとなる。欧米語の変数名は7文字以下で表わそうとすれば略号とならざるを得ず、方程式系は

一種の暗号になってしまうが、漢字7文字もあればほとんどの概念を間違いないで伝達することができるので、初めての人も文章を読むように方程式を読み取り、短時間でモデルを理解するようになる。このメリットはもっと強調されてよい。

話を本筋に戻して、さて、所与のパラメータは次の6個である。基本ケースとして次の値を与える。

$$\begin{array}{lll} \text{耐用年数} = 16 & (\text{定数 } 1, \text{ 定数 } 2) = (0, 1) & \text{返済期間} = 8 \\ \text{利率} = 0.055 & \text{資本係数} = 1.4 & \text{平滑化定数} = 2 \end{array}$$

不動点は次のようにして求められる。不動点ではすべてのストックの期首・期末残高が等しいから、フローを連立させて解いて整理すると、

- ① 設備目標水準 - 生産設備 = 1
- ② 投資財源² = 生産設備 / 耐用年数
- ③ 投資財源 = 企業価値
- ④ 借入残高 = (生産設備 / 耐用年数 - 投資財源) × 返済期間
- ⑤ 利益係数 × 生産設備 / 資本係数 = (金利 + 1 / 返済期間) × 借入残高 + 投資財源

を得る。経営者の問題は初期における生産設備の水準を見て、投資財源と借入残高の初期値を調整し、均衡水準を達成し得るように設備目標水準を定め、資金が回ってゆくように整合性ある利益係数の設定をなすことである。その上でもし生産設備の調整がちょうど企業価値に見合う時間的長さで達成されれば、この企業は不動点に安住し続けることができる。

たとえば、生産設備の初期値が25(千万円)であったとしよう。②と④からこれに対する投資財源と借入残高の初期値はそれぞれ1.25(千万円)、2.5(千万円)で、設定すべき設備目標は①より26(千万円)である。製品の価格設定と需要の開拓による売上の確保と、経営努力による費用削減の結果、利益係数を生産物の9.52%(⑤より)とすることができて、投資による設備の調整が平均9.6ヵ月(=1/1.25)の遅れで資金調達ができ、さらに平

均 9.6 ヶ月の遅れで設備取得ができるのであれば、システムは不動点にあって変動しない。利益係数が変化しない限りにおいてこの企業は安定した経営を未来永劫継続してゆくことができる。

同じパラメータの値に対して、設備目標水準を27(千万円)として出発したらどうなるであろうか。この結果を図3に示してある。システムは定常から離れて振動しながら新しい均衡水準を求めてゆっくりと収斂してゆく。ただしこの場合、長期的には手元流動性が不足することになるので、利益係数を9.58%程度に高めてやる必要がある。

図3の(c)と(d)は、相空間における軌道をそれぞれ(生産設備-投資財源)平面および(投資財源-企業価値)平面に投影したものである。時間の経過にしたがって内側へと巻き込んでゆく渦巻きが観察される。

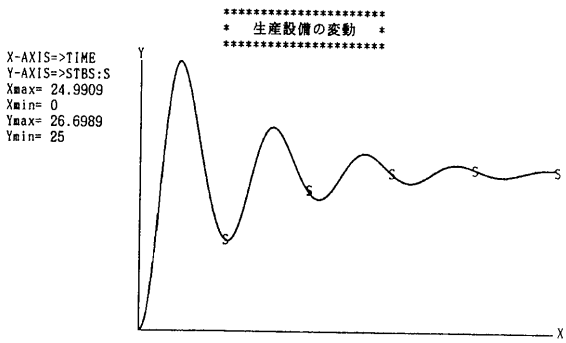


図 3 (a)

[2] 決定論的カ

オス

前のセクションで定式化した資本調達モデルは、構造がきわめてシンプルであり、どのような企業にも観察されるノーマル

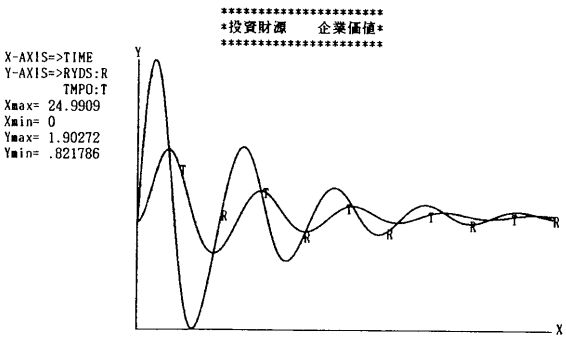


図 3 (b)

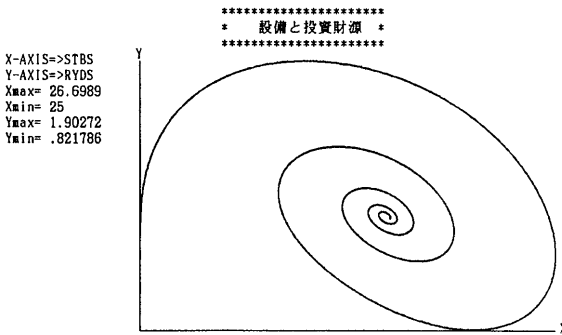


図3 (c)

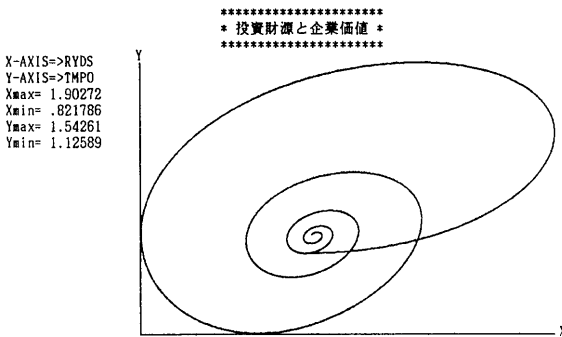


図3 (d)

でリーズナブルな関係のみをとりあげているという意味で普遍性があると言って良いであろう。しかも全体は決定論（確定性）で貫かれているので、新たに外生的攪乱要因を導入しない限り不確実性とは関係がなく、与えられた初期条件のもとで未来永劫確定的な予測を導き出すことが可能である。

現実の企業経営は変化する環境にさらされており確定的ということはありません。たとえば市場環境が変れば売上が変化し、資源環境が変れば費用が変化します。このような環境変化に対して経営者は適応的の行動を取り、この場合であれば前節末の方程式を利用して適切な設備目標水準を改訂してゆくことになる。前に見たシミュレーション結果は設備目標水準を固定的に考えていたが、それでも不動点から離れることによりシステムは長期間にわたる変動を示した。環境の変化が激しければ設備目標水準の変更も頻繁であり、環境変化の予想には不確実性がつきまとうので、当然このようにシンプルなモデルでも実際のビヘイビアは複雑なものとなる。

しかし、これから検討するいくつかのシミュレーション結果は、真に驚くべきことであるが、なんら外生的変動要因や不確実性を導入しなくとも、われわれのモデルの解は、ある意味で予測不能なほど複雑なものに十分なり得るということを示している。決定論的モデルから導き出されるこの予測不能性は、必ずしも新しく発見されたものというわけではないが、1980年代になってパソコンによるSDシミュレーションが盛んになるにつれて、急速にシステムダイナミストの間で関心を集めるようになった。

前と全く同じモデルでパラメータ：

耐用年数=16 (定数1, 定数2)=(0,1) 返済期間=8
 利率=0.055 資本係数=1.4 平滑化定数=1
 利益係数=0.104 設備目標水準=50

に対して、初期条件：

生産設備=49 投資財源=1.75 企業価値=1.75
 借入残高=10.5

は一つの不動点になっている。実際にシミュレーションを試みるとすべての変数の時間的変動はフラットな横一直線となり、相空間の軌道はただ1点になって動かない。

生産設備の初期値を45にしてシミュレーションした結果が図4である。

ここでDTは0.001,

シミュレーション
 期間は25年である。

(a)が生産設備, (b)が投資財源, (c)が企業価値, (d)が借入残高, (e)が流動性残高のそれぞれの時間的変動を表

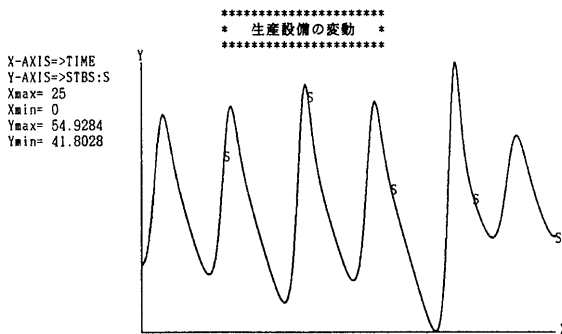


図4 (a)

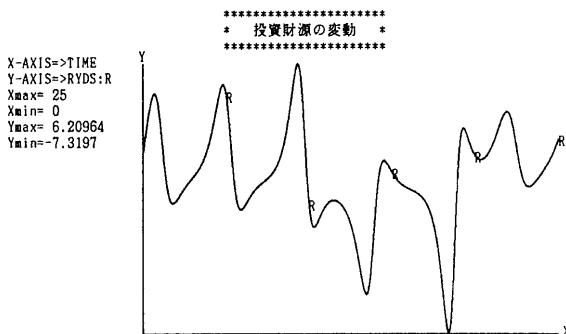


図 4 (b)

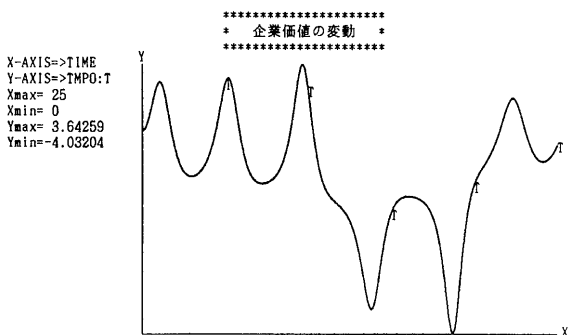


図 4 (c)

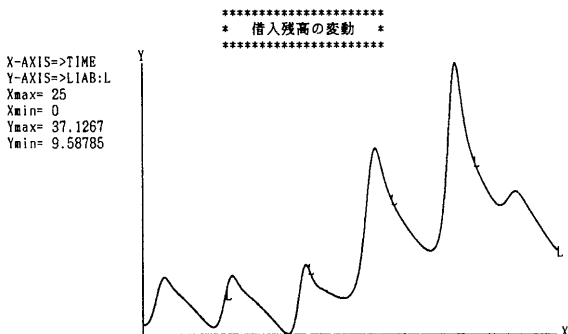


図 4 (d)

わしている。図 3 の場合と全く様相が異なり、(この図からは) 定常水準への収束が期待できそうにない不規則の変動が現われている。実際これらの変動パターンは初期値のとりかたによって大きく変化し線型の予想がほとんどたてられないことが、生産設備の初期値をいろいろに替えてリランしてみると分かる。

図 4 の(f)は、生産設備を X 軸に、投資財源を Y 軸にとって時間の経過にしたがってプロットしたものであるが、二通りの渦が流れるようにつながっている。

(g)は3次元の相空間（生産設備、投資残高、企業価値）の軌道である。薄い帯上の渦巻きがねじれて空間に浮いておりストレンジ・アトラクタ状の様体が観察される。

X-AXIS=>TIME
Y-AXIS=>REQL:C
Xmax= 25
Xmin= 0
Ymax= 38.7269
Ymin= 12.9186

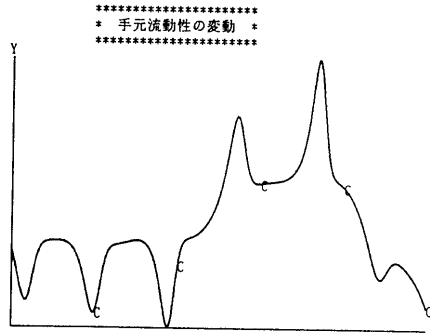


図 4 (e)

これらの結果は、われわれの資本調達モデルが非常に現実的なパラメータのもとでカオス風の変動を示し得るということを示唆している。

X-AXIS=>STBS
Y-AXIS=>RYDS
Xmax= 54.9284
Xmin= 41.8028
Ymax= 6.20964
Ymin=-7.3197

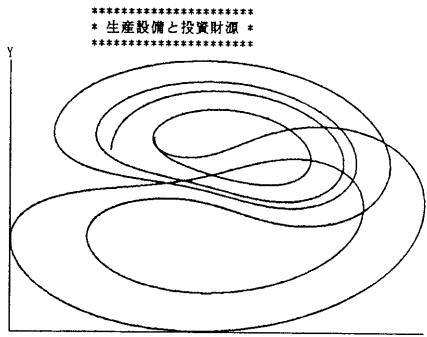


図 4 (f)

これが決定論的カオスであるかどうかはしばらく置くとして、シンプルで現実的なモデルから、社会科学に意味あるパラメータの範囲内で、現実的に意味ある25年間程度の

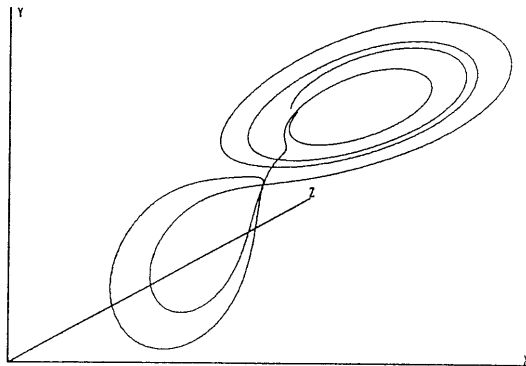


図 4 (g)

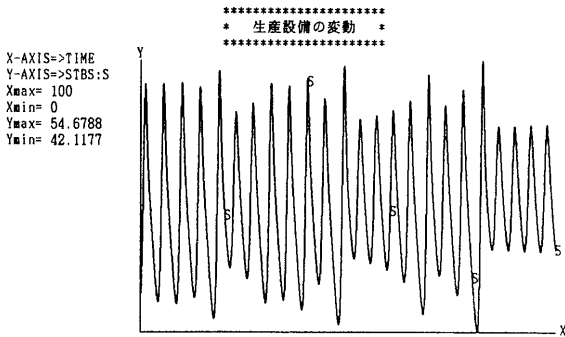


図 5 (a)

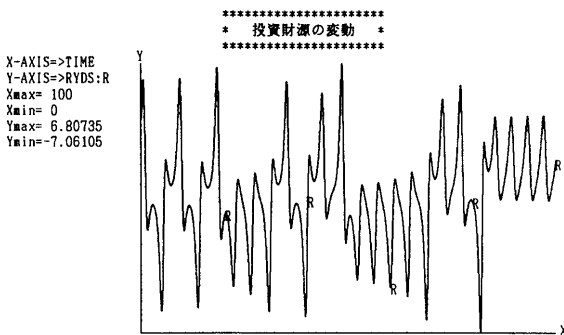


図 5 (b)

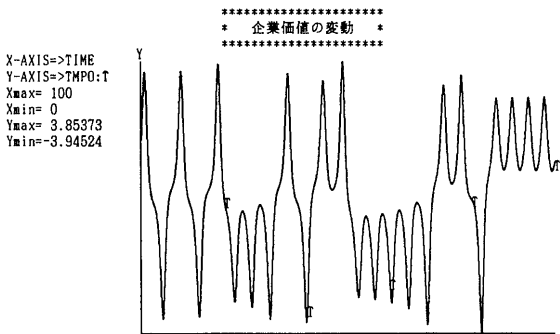


図 5 (c)

シミュレーション
期間内に、このよ
うな一見カオス的
変動が導き出され
ることは1つの驚
きである。

しかしこれが驚
きであるのは、わ
れわれが長い間線
型モデルに慣れ親
しんできた結果、
安定的な均衡解と
いうもののイメージを
図3のような
減衰振動と思い込
んでしまった重大
な誤解に基づくも
のである。減衰振
動・周期振動・発
散の3通りしか解
がない場合には決
定論(確定性)の
意味は明白である。
図4に見られるよ
うな非周期的振動
は外生的攪乱によ
るもので確率的変

動としてとりあつかえばよい。この線型モデルのもとでの常識は、線型モデルの場合においてさえ誤っているが、分析家のモデリング方針を決める際のインプリシットな制約となっていたことは否めない。

X-AXIS=>STBS
Y-AXIS=>RYDS
Xmax= 54.6788
Xmin= 42.1177
Ymax= 6.80735
Ymin=-7.06105

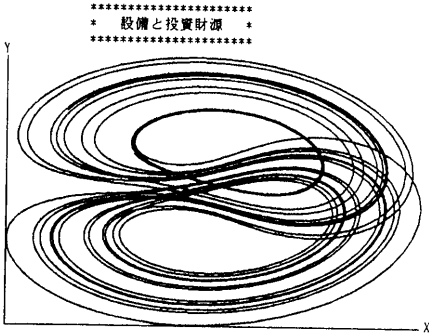


図 5 (d)

この資本調達モデルが線型モデルと決定的に異なる所以は安定な不動点が複数存在することであり、それは極く簡単な非線型性の導入（この場合は調整期間を企業価値の有理関数とした）の直接的帰結である。このことは変数の時間的変動にある種の初期値依存性を与え

X-AXIS=>RYDS
Y-AXIS=>TMPO
Xmax= 6.80735
Xmin=-7.06105
Ymax= 3.85373
Ymin=-3.94524

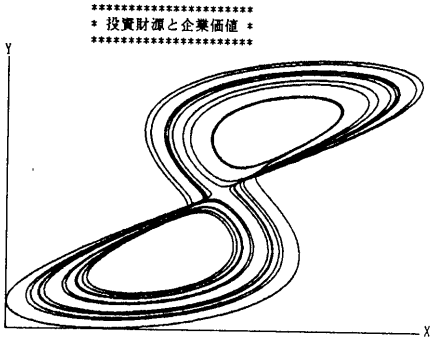


図 5 (e)

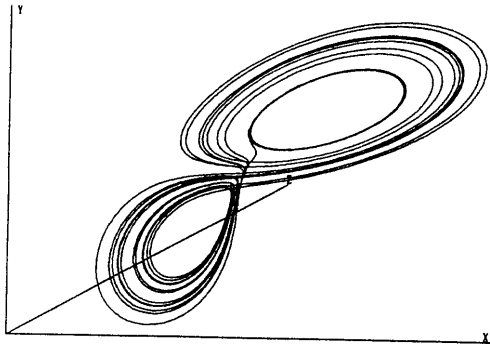


図 5 (f)

る。

ここまで、筆者は注意深く、図4のシミュレーション結果からこれがカオスであるとは言っていないことに注意して欲しい。ストレンジ・アトラクタが存在すればカオスであると言ってよいが、シミュレーションによってそれがストレンジ・アトラクタであることを証明することはできない。

初期条件を(生産設備, 投資財源, 企業価値)=(43.9195, 4.00698, 1.59322)としてシミュレーション期間100年でランさせた結果を図5に示す。相空間の軌道を見れば絵画的にはこれは教科書にのっているロレンツ・アトラクタの形を成している。与えられたパラメータ空間の1点でこれが正しくアトラクタになっていることを示すには、相空間の任意の1点から初められたすべてのシミュレーション結果がこの図形の全体を構成することを示唆しなくてはならない。

図6は初期条件を(46.867612, 1.75, 1.75)とした場合のシミュレーション結果であるが、ここではDT=0.01, シミュレーション期間400年としてある。これを見てわかるように、生産設備の初期値がわずかに変わっただけでこの軌道が図5(f)に乗るまでには300年を要するということである。計算時間の制約を問題にすることはないが、SDのシミュレーション・スペックでLENGTH=400年は異常である。

われわれの目的は現実的なモデルを定式化して、そのシミュレーション・リランを繰り返すことによってファクトを発見し、そこから政策的インプリケーションを抽出することである。しかしカオス風の変動を確かにカオスであると示唆するためには、初期の300年間の変数の挙動には意味がないものとしてこれを捨て去った後の100年を問題にするという観点からシミュレーションを計画しなければならない。

図6の結果は、最初の300年間このシステムはリミット・サイクル上を運動していることを示している。しかし突然300年の眠りから覚めたかのごとくカオス風軌道にのり移る。その前触れもなければ王子様のキスのよ

うな外生的ショックもなしに、全く確定的に初期条件によって約束されていた予定の行動として目覚めるのである。

SD シミュレーションの本来の目的からすればカオス研究としては意味のない最初の300年以前がより重要であり、その意味の初期値依存性の方がレリヴァントな検討課題となるはずである。

カオスにおける初期値への鋭敏依存性と流れの位相的推移性は無限時間での解曲線の運動を問題にする概念である。したがって300年であろうと10000年で

X-AXIS=>TIME
Y-AXIS=>STBS:S
Xmax= 399.849
Xmin= 0
Ymax= 54.7261
Ymin= 42.0605

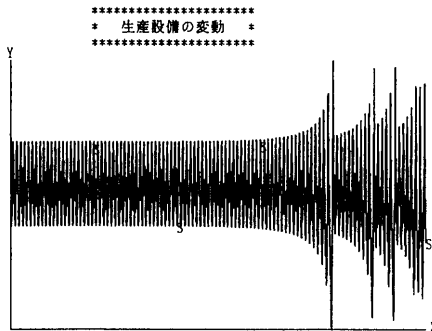


図 6 (a)

X-AXIS=>TIME
Y-AXIS=>RYDS:R
Xmax= 399.849
Xmin= 0
Ymax= 6.71591
Ymin=-7.01455

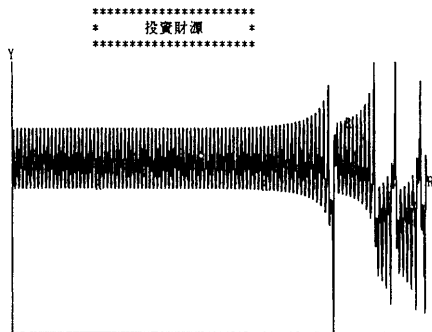


図 6 (b)

X-AXIS=>TIME
Y-AXIS=>TMPQ:T
Xmax= 399.849
Xmin= 0
Ymax= 3.84153
Ymin=-3.96047

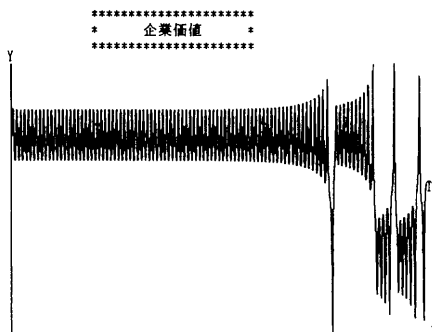


図 6 (c)

あろうと、 $t \rightarrow \infty$ をシミュレートし得るだけのシミュレーション期間が必要となり、その長さは初期値のとりかたに依存して変る。数10年で済むこともあるし数億年でも足りない場合もある。

[3] カオスについての覚書

3-1. SD モデルとカオス

図 6 ではシミュレーション期間を 400 年とした計算結果を示した。さらに長く計算を続けるとどうなるであろうか。実は 400 年経過後システムは不動点へ向けての収束軌道に入る。不動点は $(49, \pm 1.75, \pm 1.75)$ で 2 つとも安定な不動点であるから、その先をいくら計算してももはや振動は生じない。したがって以上で与えたパラメータ空間上の点は解が減衰振動を示す領域にある。図 5 の(a), (b), (c)で観察した非周期的振動解はカオスではない。

企業の資本調達行動が、固定された目標設備水準へ向けての調整となされる時、どのようなシステム変動がもたらされるかについて言えることは、せいぜい最初の数10年のシミュレーション結果を問題として検討されるべきである。その場合に 500 年先の軌道の定性によるパラメータ空間の分岐テストは意味をなさない。

おそらく重要なのは、長期的には減衰振動して不動点に収束するパラメータの範囲内においても、数10年の時間的視野においては現われてくる減衰振動、周期振動、非周期振動を、それぞれもたらず相空間における初期値の集合を確定することであろう。興味深いのは、図 6 のように時間軸上のある区間では周期振動を示し、次のある区間で非周期振動を示し、最後に減衰振動を示すといった解の振る舞いである。現実システムのモデリングとシミュレーションから現実的インプリケーションを抜き出す分析においては、わずかな非線型性の導入がもたらすこのような反直感的システム変動を現実システムのタームで説明することが望まれる。

3-2. ロレンツ方程式

図6の結果がカオスでないからといってわれわれの資本調達モデルがカオスを導かないということではない。

生産設備を x ，投資財源を y ，企業価値を z ，調整期間を w ，自己資本形成を r として，ダイナモ方程式を書き直すと次のようになる。すなわち

$$x.K = x.J + DT \times (y.J/w.J - x.J/T)$$

$$y.K = y.J + DT \times ((R - x.J)/w.J - r.JK)$$

$$z.K = z.J + DT \times (r.JK - z.J)/H$$

$$r.KL = y.K$$

$$w.K = 1/z.K$$

ここで R は設備目標水準， T は耐用年数， H は平滑化定数である。 r と w を消去し，レベル方程式の右辺第1項を左辺に移行して， $DT \rightarrow 0$ とすると次の微分方程式を得る。

$$\dot{x} = yz - bx$$

$$\dot{y} = (R - x)z - y$$

$$\dot{z} = \sigma(y - z)$$

ただし， $b = 1/T$ ， $\sigma = 1/H$ である。

これは， σ をプランドル (Prandtl) 数， R をレイリー (Rayleigh) 数， b を地域の広さとするとき，地面が吸収した太陽熱によって下から熱せられた大気のプロウ z と，(垂直，水平) 方向での温度変化 (x, y) をあらわすベクトル場，すなわちロレンツ (Lorenz) 方程式にほかならない。例えばパラメータ (σ, R, b) を $(10, 28, 8/3)$ としてやると，ストレンジ・アトラクタ (図5と同じ形のもの) が生じる。ロレンツ方程式についてはストレンジ・アトラクタの存在に関する厳密な結果が示されている⁷⁾。

3-3. カオスの数学的定義

① $C^r (r \geq 1)$ 自励ベクトル場： $\dot{x} = f(x)$

で生成される流れを $\phi(t, x)$ で表わし，それが全ての $t > 0$ で存在する

ものとする。

- ② n 次元ユークリッド空間上の集合 A はコンパクトで、 $\phi(t, x)$ で不変とする。
- ③ ある $\varepsilon > 0$ が存在して A に属する任意の x と任意の x の近傍 U について、 U に属するある y と $t > 0$ が存在して、 $|\phi(t, x) - \phi(t, y)| > \varepsilon$ が成立するとき、
流れ $\phi(t, x)$ は A 上で初期条件への鋭敏依存性を持つという。
- ④ A がカオス的であるとは
 1. $\phi(t, x)$ が A 上で初期条件への鋭敏依存性を持つこと、
 2. $\phi(t, x)$ が A 上で位相的推移性を持つを満たすことである。さらに、
 3. $\phi(t, x)$ の周期軌道は A で稠密である。
- ⑤ n 次元ユークリッド空間の部分集合 A がアトラクタであるとする。 A がカオス的であればストレンジ・アトラクタと呼ばれる。
- ⑥ 最大リアプノフ (Lyapunov) 数が正であればカオスであるといわれている。ただしアトラクタの軌道の分離率を計算して平均をとる方法について筆者は疑問を抱いている。

第3節 システムダイナミクスの今後の発展

システムダイナミクスは複雑なシステムを研究するアプローチである。最近のカオス研究は簡単なシステムでも、時として複雑な変動を示すことを教えている。

複雑なシステム—現実の社会がまさしくそれに当る—が成長と減退を繰り返す各局面においていかなるフィードバックが優勢になっているかを、因果論的に説明するためのモデリングは、シミュレーションによってそのもっともらしさを確かめながら、現実性を増す方向でモデル改訂を無限に繰り返してゆくことを前提として正当化される。その過程で得られる実証

の命題はそれ自体として独立した社会科学的知識につけ加えられることを必ずしも主張するものではない。

モデルの妥当性は検証されるものではなく、社会的相互作用を通して合意されることが期待されるに過ぎない。したがってSDアプローチを通して得られる複雑なシステムについての知識は、refutable なそのモデル全体とその開かれた改訂プロセスと一体になったものとして呈示されることによって初めて意味をもつ。この条件は長い間満たされてこなかった。

ほんのここ数年の間に現実化されたパーソナル・コンピューティングの普及とSD用ソフトウェアの革新とが、この条件を文字どおり整えることになったことの意義は大きい。すなわち、SDアプローチにより得られた命題をモデルとその改訂プロセスと一体となったものとして伝達することが広い範囲で可能となり、社会科学の議論においても、政策科学の議論においても、システムダイナミクスによる論点形成が受け容れられる条件が満たされたのである⁸⁾。

もはやSDはシステムダイナミシストの専有物ではなく、ダイナモはワープロやスプレッドシートといったステイショナリ (stationery) の一部になりつつある。

このような状況のもとでの本来のシステムダイナミシストの研究方向は大きく二派に分れる。一は Forrester 学派、いま一は Prigogine 学派と仮に名付けられる⁹⁾。前者は現実的予測可能性を追及するグループであり、多重ループ・フィードバック構造として現実システムのフォーマルモデリングを手掛ける。後者は予測不能性を研究するグループで、少ない変数の非線型モデルを用いて数学的理論を展開する。

前者の研究テーマは、主に、ナショナルエコノミーモデルに代表されるようなマクロ的集計量で表わされる現象であり、後者の研究テーマは、主に、自己組織化といったミクロ的な個体運動のダイナミクスである。カオス研究は後者のテーマに属する。筆者は両派に同じくらいのシンパシーを

もっている。

システムダイナミクスの今後の発展は、しかし、システムダイナミシストの専門的研究の成果よりは、普及したSD分析ツールの現実的使用による社会全般のダイナミクス認識の一新と、政策改善へ向けての議論の合理化によってもたらされるだろう。コンピュータリゼーションの帰結＝人類の社会的洞察力の進化＝は今まさにここから始ろうとしている。

註

- 1) Casti (1981) はこの引用を節のタイトルにまで付けて本当に罵っている。他の批判としてはたとえば Greenberger 他 (1976) を参照のこと。
- 2) Nordhaus (1973) はこの引用を論文のサブタイトルに使っている。これに対する Forrester 側の反論については、Forrester 他 (1974) を参照のこと。
- 3) Smuels (1969) より引用。
- 4) Radzicki (1990) は長年にわたる新古典派エコノミストの悪罵によって、エコノミストはシステムダイナミクスがお嫌いのだと述べている。
- 5) Friedman (1953) のテーゼ。
- 6) Simon (1979) のノーベル賞受賞記念論文を参照のこと。
- 7) ロレンツ方程式については、Sparrow (1982) が詳しい。
- 8) 宮川他 (1988) を参照のこと。
- 9) Rasmussen 他 (1985) がこの学派の命名者である。

参 考 文 献

- Casti, J., "Systemism, System Theory, and Social System Modeling", *Regional Science and Urban Economics* 11, 405-424. 1981.
- Greenberger, M., Crenson, M. A. and Crissey, B. L., *Models in the Policy Process* Russell Sage Foundation 1976.
- Forrester, J. W., Low, G. W. and Mass, N. J., "The Debate on World Dynamics: A Response to Nordhaus", *Policy Sciences* 5, 169-190. 1974.
- Friedman, M., "The Methodology of Positive Economics", *Essays in Positive Economics* ed. Friedman, 3-43. Univ. of Chicago Press. 1953.

- Nordhaus, W. D., "World Dynamics : Measurement Without Data", *Economic Journal* 83, 1156-1183. 1973.
- Radzicki, M. J., "methodologia oeconomiae et systematis dynamis", *System Dynamics Review* Vol. 6 No. 2, 123-147. 1990.
- Rasmussen, S., Mosekilde, E. and Sterman, J. D., "Bifurcations and Chaotic Behavior in a Simple Model of Economic Long Wave", *System Dynamics Review* Vol. 1 No. 1, 92-110. 1985.
- Samuels, W. J., "On the Future of Institutional Economics", *Journal of Economic Issues* 3, 67-72. 1969.
- Samuelson, P. A., "Problems of Methodology: Discussion", *American Economic Review* 53, 231-236. 1963.
- Simon, H. A., "Rational Decision Making in Business Organization", *American Economic Review* 69, 493-513. 1979.
- Sparrow, C., *The Lorenz Equations*, Springer-Verlag. 1982.
- 宮川公男・小林秀徳 システム・ダイナミクスー経営・経済系の動学分析, 白桃書房, 1988.