計測自動制御学会東北支部　第191回研究集会（2000.11.18）
資料番号　191-1

連鎖反応を用いた複雑系のシミュレーション

The simulation of complex systems using the chain reaction

○板倉　大介*　　坂野　進**
○Daisuke Itakura*　　Susumu Sakano**

*日本大学大学院工学研究科　**日本大学工学部
*, ** Nihon. University, College Of Engineering

KEY WORD：複雑系（complex systems），連鎖反応（chain reaction），
自己組織化臨界現象（self-organized criticality），格子モデル（cell-model）
オートマトン法（automaton model），確率モデル（probability model），

連絡先：〒963-1165　福島県郡山市田村町徳定字中河原1
日本大学　工学部　機械工学科　メカトロニクス研究室
Tel：024-956-8774,　Fax：024-956-8860,　E-mail：sakano@mech.ce.nihon-u.ac.jp

1．はじめに

これまでの近代科学の基礎は、様々な現象を単純な数式や法則及び原理を用いて表すことに確立されてきた。自然や工学において遭遇する多少複雑な現象も、その現象を構成している素過程に分解し、この法則や原理を組み合わせて適用することで解明されてきた。我々をとりまく現代技術の成果は、このようなアプローチにより達成されたものである。

しかし、こうした従来の手法の延長上では解明されないものに複雑現象がある。この複雑現象は、他の現象の解明がかなり進んだこと、及びコンピュータの性能が向上したことにより、学問として最近注目されるようになった。こうした複雑系を解明する方法（セルオートマトン法）を機械制御や生産システムの最適化技術に適応するアプローチとしての可能性について検討する。

2．研究概要

2・1　自己組織化臨界現象について

ここで、複雑系を解明するための手がかりとして「自己組織化」について言及する。自己組織化現象の最も大きな特長は、外部からのコントロールなしに自発的に自然とシステムがまわりとの相互の関わり合い（局所的な相互作用）を積み重ねていくうちに、ある構造を形成し組織が自然に作られ、秩序だった状態に時間発展していくことである。

2・2　セルオートマトン法について

同じ大きさの正方形（以下セルと言う）

で区切られた碁盤のようなセルが存在する。隣のセルの状態によって、各セルの状態が変化し、その変わり方の規則を定め、時間発展と共に規則性を生み出すことである。このセルオートマトン法では、簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現することが可能であるのに対して、微分方程式モデルでは、現象に関係する素過程と相互作用の関係が解明されなければ不可能で、外部からの入力によってパターン形成モデル等の変更等の操作を行わない限り、発生させることが出来ない。

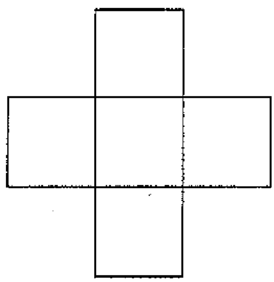

Fig 1：2次元セルオートマン法における隣接のセル（ノイマン近傍）

3．考えられる適用分野と一例としてのワタリバッタ

・自己組織型生産システムの可能性

自己組織化（製造フロア内の自律要素間の局所的な相互作用の結果として全体的な振る舞いが創発するプロセス）することにより、システム内部の変動や外部からの環境変動（需要変動など）に対して適応的に振舞う生産システムの開発への適応が考えられる。しかし、問題を簡単にする為に、次の実験モデルを用いた。

4．実験モデル

実験は、「ワタリバッタ大発生のシナリオ」を「変動格子上の確率モデル」を用いてシミュレーションを行う。

4・1　具体的な実験方法

バッタが生息する場所を単純な平面とし、ここでは、１辺がＬの正方形（１辺がＬのセル）とする。そして、何匹かのバッタが集合した状態を『粒子』として表現する。即ち、この『粒子』は、幾らかの量（情報）の粒（バッタ単体）が集合し、ある程度の大きな集団を形成したものである。

この粒子の集団は、空間的に広がりをもっているのでＬ×Ｌの正方形をＬの２乗等分して正方格子にする。そして、その各々の単位小正方形（これをサイトと呼ぶ）ごとに、粒の量と状態を集約して表し、１つのサイトの中には、一定量の粒しか存在出来ないものとし、一定量の集団を１つの粒子で表す。(Fig 2)

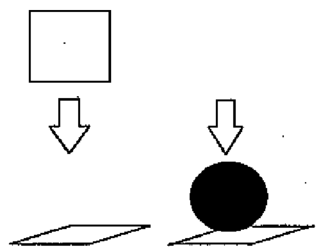

Fig 2：バッタ集団の表現法

バッタは生息密度の大小によって、群居相と孤独相、そしてこの両者の中間段階にある移行相と言うように、いくつかの相の状態を持ち、全く同一種でありながら、相異変をおこすとその形態や行動パターンが大きく変化する。

この粒子は発生時点の孤独相から、増

殖していく段階の中間層、そして大発生にいたる群居相へと粒子の密度が上昇するにつれてレベルアップしていく。このモデルでは、孤独相をレベル１とし、群居相に至るにつれてそのレベル数は増加していく。群居相はレベル３である。また、各レベルにある粒子は遷移率μで下のレベルに落ちていくものとする。

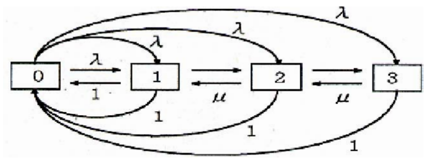

Fig３：遷移ルールをまとめたダイアグラム
０＝空サイトの状態
１から３はバッタ集団の群居相化レベル
レベル１を孤独相
レベル２を移行相
レベル３を群居相
とする。

Ｌ×Ｌの正方格子の横Ｉ列、縦Ｊ段目のサイトを、サイト（i,j）とし、サイト（i,j）の上に１つの変数Ｓ（i,j）を割り当てる。
１つの粒子の集団は、様々なレベルの粒子の集まりである。
その粒子集団の中で、最もポピュラーなレベルがＰであるとすると、この時、変数は

$$S(i,j) = P \quad \cdots\cdots (1)$$

（ただし、$1 \leqq P \leqq 3$）

である。

この粒子は、増殖するし消滅する。その兼ね合いで、ある時粒子の集団は空間的に拡大し隣のサイトの領域にも侵入していくこともあれば、解体され消滅することもあるので、格子モデルでは、この様な時間的発展はFig3のようになる。

また、本研究の場合は、ニュートン方程式で記述される力学系のように、次に起こる変化が確定しているのではなく、次に起こりうる変化の実現確率（これを遷移率とする）のみが確定しているが、起こりうるケースのうちのどれが実際に実現するかはランダムである。このように膨大な数の粒子が、その影響をお互いに及ぼし合いながら形成する複雑系の記述には確率モデルが有効であることを考慮して、ここでは、粒子の消滅率を１に規格化し、これに対して

本研究のモデルは、粒子が存在出来る領域は、Ｌ×Ｌ個のサイトからなる正方格子である。よってなだれ現象が引き起こされる場合は、要因となる各々の因子が、複雑に絡み合い極めて限られた状態で発生する事から、そこで、その変動を表すためにモデルの格子サイズを周期的に変動させる。

５．シミュレーション方法

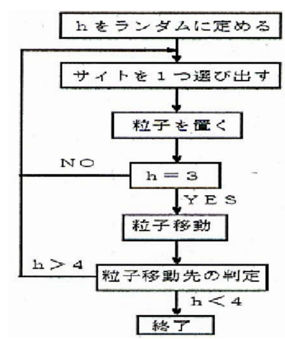

Fig4：シミュレーションのフローチャート

シミュレーションは、上に示すフローチャートに従い行う。『サイトを１つ選び出す』から『粒子移動先の判定』までを１ス

テップとする。連鎖が一回も起こらないこともあれば、延々と続くこともある。そして、この連鎖反応が大発生を示し、連鎖反応の規模が大発生の大きさに対応する。

6. 実験結果

実験シミュレーションによって出力された結果を Fig5 に示す。Fig5 は、経過時間と各相の粒子個数の関係である。また、実験結果は、時間経過と共に h の分布が一定の比率に収束しており、粒子の崩壊（バッタの大発生）の規模が一様に分布していることがわかる。

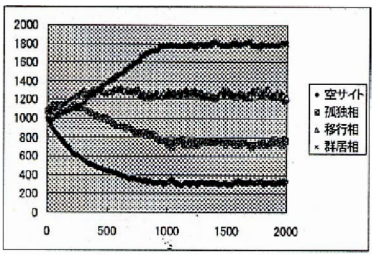

Fig5：出力結果

（1）シミュレーション結果から、系は、時間経過と共に、定常状態に収束し、『自己組織化臨界現象』を示すことができた。

（2）バッタの大発生は、孤独相・移行相・群居相の各相の臨界値がカギであり、臨界値を越えると系は、一定の比率に収束してしまうことがわかった。

（3）複雑系の研究には、モデルをつくり自己組織化を利用したボトムアップ方式が非常に有効であることがわかった。

7. まとめ

複雑系の研究において、『複雑系の客観的な尺度』や『複雑系の定義』といったものが依然として不明瞭である現時点では、やはり複雑な要因の中にある１側面を取り出し、それを科学的・分析的に現象をある程度解明することが重要とされている。本研究では、この複雑系に対して、ある詳細を切り取って見るのではなく、全体像を眺め、自己組織化を利用したボトムアップ方式を用いることにより再現することが、ねらいである。その為に確率モデルを用いた。特に、これまで数多くの物理現象の解明に役立ってきた確率モデルの手法が、複雑系の研究にも有効なのかどうかついて本実験を通して検討してきた。実験結果は、組織形成のシナリオがモデル計算を通して数値的に具体化することが可能であること示している。このモデル化による組織形成の技術を機械制御や生産システムの最適化技術に導入できれば、リアルタイムにスケジュールを生成し、環境変動に適応可能な分散管理型生産システムや柔軟性を備えた生産システムの構築が可能となり、非常に強力な手段となる。

―参考文献―

（1）　加藤恭義・光成友孝・築山洋　共著：セルオートマトン法＝複雑系の自己組織化と超並列処理＝（1998）森北出版株式会社

（2）香取理　著：複雑系を解く確率モデル（1997）講談社

（3）矢部孝・川田重夫・福田昌宏　共著：シミュレーション物理入門（1996）朝倉書店

（4）上田顕　著：コンピュータシミュレーション＝マクロな系の中の原子運動＝（1994）朝倉書店