

複雑系入門

C O N T E N T S

PART I

『複雑系』科学

I

CHAPTER 1 『複雑系』とは何か？	2
1.1 ● 疑問形から始まる	3
1.2 ● 世界の階層構造	4
1.3 ● 固有名詞としての『複雑系』	6
1.3.1 「複雑系」という言葉	
1.3.2 「複雑系」の一つのイメージ	
1.3.3 なぜ「複雑系」は分解できないのか	
1.4 ● 創発	8
1.4.1 システム論における「創発」	
1.4.2 人工生命分野における「創発」	
1.4.3 創発の理解に向けて	
1.5 ● 『複雑系』理解への道	10
CHAPTER 2 『複雑系』科学の位置	12
2.1 ● 個別科学とその階層性	13
2.2 ● 『複雑系』科学の位置	14
2.3 ● 『複雑系』科学は科学革命を起こしたか？	15
CHAPTER 3 『複雑系』科学の方法論	19
3.1 ● 構成的手法によるアプローチ	20
3.2 ● シミュレーション	21
3.2.1 シミュレーションの種類	
3.2.2 シミュレーションと実験は異なる	
3.2.3 シミュレーションの陰にモデルあり	
3.2.4 シミュレーションによる同定の手順	
3.3 ● アナロジー	25
3.3.1 アナロジーの種類	
3.3.2 比較対象の適切なレベル	
3.4 ● 『複雑系』を研究しなければ『複雑系』科学ではない	28
3.5 ● 「理解の仕方」を理解する	29
作業定義：Working Definition	31

PART II 複雑性の現象

33

CHAPTER 4 フラクタル	34
4.1 ● フラクタルの発見——海岸の長さはどうやって測るのか?	35
4.2 ● 自己相似性—フラクタル図形	37
4.2.1 コッホ曲線	
4.2.2 カントール集合	
4.2.3 ペアノ曲線とシルピンスキーのギャスケット	
4.2.4 フラクタル幾何学	
4.3 ● フラクタル次元	40
4.3.1 次元の概念	
4.3.2 フラクタル次元	
4.4 ● 自然の中のフラクタル	43
4.5 ● 自己相似性を用いて自然の風景を再現する	43
4.6 ● 『複雑系』科学とフラクタル	44
APPENDIX : べき乗分布	45
CHAPTER 5 自己組織的臨界状態	49
5.1 ● 砂山の雪崩に隠された規則	50
5.1.1 自己組織的臨界状態	
5.1.2 雪崩のシミュレーション	
5.2 ● 自然・社会の中にみられるべき乗法則	52
5.2.1 地震	
5.2.2 都市人口と都市のランク	
5.2.3 輸入額と国別ランク	
5.2.4 株価の変動	
5.2.5 単語とランク	
5.3 ● 『複雑系』科学と自己組織的臨界状態	58

CHAPTER 6 カオス	60
6.1 ● 決定論と非決定論	61
6.2 ● カオスとバタフライ効果	61
6.3 ● カオスの生成	62
6.3.1 親世代と子世代の個体数の関係	
6.3.2 ロジスティック写像	
6.3.3 コントロール・パラメータ a の値による振舞いの変化	
6.3.4 分岐図と窓	
6.4 ● 動的な振舞いの把握	67
6.4.1 力学系と相空間	
6.4.2 保存系と散逸系	
6.4.3 アトラクタ	
6.5 ● カオスのアトラクタ	70
6.6 ● カオス生成の原理と特徴	72
6.6.1 バイコね変換	
6.6.2 カオスにひそむフラクタル構造	
6.7 ● 『複雑系』科学における「カオス」の位置	74
CHAPTER 7 カオスの縁	76
7.1 ● セル・オートマトン	77
7.1.1 オートマトン	
7.1.2 セル・オートマトン	
7.1.3 ライフ・ゲーム	
7.2 ● 1次元セル・オートマトンとクラス分類	80
7.2.1 1次元セル・オートマトン	
7.2.2 状態 3 近傍の場合	
7.2.3 1次元セル・オートマトンのクラス分類	
7.3 ● λ パラメータとカオスの縁	84
7.3.1 λ パラメータ	
7.3.2 λ パラメータとセル・オートマトンの振舞い	
7.4 ● λ パラメータと複雑さ	85
7.5 ● カオスの縁	86

PART III 複雑適応系

89

CHAPTER 8 複雑適応系	90
8.1 ● 複雑適応系	91
8.1.1 複雑適応系としての生物の進化	
8.1.2 複雑適応系としての生物の学習	
8.2 ● スキーマと適応度地形	92
8.3 ● 集合的複雑適応系	94
8.4 ● 適応的エージェント	96
8.4.1 適応的エージェントの内部構造	
8.4.2 クラシファイアー・システムの仕組み	
8.4.3 クラシファイアーシステムの動作	
8.4.4 鳥エージェントの例	
8.5 ● 複雑適応系と『複雑系』	100
CHAPTER 9 進化と遺伝的アルゴリズム	102
9.1 ● 遺伝子という情報	103
9.2 ● ダーウィンの進化論と利己的遺伝子	104
9.3 ● 遺伝的アルゴリズム	106
9.3.1 遺伝的アルゴリズムとは何か?	
9.3.2 遺伝における情報	
9.3.3 遺伝的アルゴリズムの手順	
9.3.4 選択	
9.3.5 交叉	
9.3.6 突然変異	
9.4 ● 遺伝的アルゴリズムの実行の簡単な例	111
9.5 ● 遺伝的アルゴリズムは何をしているのか	112
9.5.1 適応度地形での理解	
9.5.2 隠れた並列性	
APPENDIX : 遺伝的アルゴリズムの実用のための補足	115

CHAPTER 10 カウフマンネットワーク	118
10.1 ● 自然淘汰と自己組織化	119
10.2 ● 自発的な生命の起源	119
10.2.1 リアクション・ネットワーク	
10.3 ● 遺伝子ネットワークの自発的秩序	123
10.3.1 細胞の分化	
10.3.2 ランダム・ブーリアンネットワーク	
10.3.3 ランダム・ブーリアンネットワークの特性	
10.3.4 自発的秩序はカオスの縁に向かう	
10.4 ● 遺伝子の非線形性と適応度地形	128
10.4.1 表現型の組み合わせと適応度	
10.4.2 NKモデルの基本	
10.4.3 適応度が他の遺伝子から独立の場合	
10.4.4 適応度が他の遺伝子から影響を受ける場合	
10.4.5 遺伝子どうしの影響と適応度地形	
10.5 ● カオスの縁への自己組織化	133
CHAPTER 11 ニューラルネットワーク	135
11.1 ● 脳とその構造	136
11.1.1 生物の脳の基本構造	
11.2 ● ニューラルネットワークのモデル	137
11.2.1 マカロック・ピッツモデル	
11.3 ● パーセプトロンによる学習	138
11.3.1 パーセプトロン	
11.3.2 パーセプトロンの限界	
11.4 ● 多層パーセプトロン	141
11.4.1 パーセプトロンを階層にする	
11.4.2 バックプロパゲーション	
11.5 ● ニューラルネットワークは何をしているのか	143
11.5.1 問題の領域分け	
11.5.2 線形分離不可能な問題	
11.5.3 多層にするとどうなるか	
11.6 ● 他モデルと今後	147

PART IV

『複雑系』科学のフロンティア

149

CHAPTER 12 『複雑系』経済学	150
12.1 ● THE FUTURE OF ECONOMICS	151
12.2 ● 新古典派経済学	152
12.3 ● 『複雑系』経済学	153
12.4 ● 構成要素：主体の内部を見つめ直す	166
12.4.1 出発点としての「限定合理性」	
12.4.2 記憶と外部の情報探索	
12.4.3 定型行動とその習得	
12.4.4 適応行動——学習	
12.5 ● 要素のつながり：ダイナミックなネットワークとしての経済	157
12.5.1 ゆるやかな結合系	
12.5.2 媒介の重要性	
12.5.3 創発現象	
12.6 ● 時間発展と進化：歴史性の重視	160
12.6.1 収束増	
12.6.2 ポジティブ・フィードバック	
12.7 ● 経済学における構成的研究事例	162
12.7.1 物々交換による貨幣の生成モデル	
12.7.2 人工株式市場	
12.7.3 人工外国為替市場	
12.8 ● 『複雑系』経済学はどこへ行くのか	168
12.8.1 二つの複雑系経済学	
12.8.2 経済学における構成的手法	
CHAPTER 13 人工生命	172
13.1 ● 「可能な生命」という視点	173
13.2 ● コンピュータ上の生命	174
13.3 ● ボイド：群れのシミュレーション	176
13.3.1 鳥ロボットの群れ	
13.3.2 ボイドは実際に群れたか	
13.3.3 現実の群れの理解のために	
13.4 ● すり抜けてしまった生命性	179
13.5 ● 『複雑系』科学における人工生命研究	180
13.5.1 自己複製と進化	
13.5.2 マシン・テープ・ネットワークの仕組み	
13.5.3 マシン・テープ・ネットワークの観察	
13.5.4 自己複製ループの進化	
13.6 ● 人工生命研究はどこに向かうのか	186

CHAPTER 14 カオス結合系	189
14.1 ● カオスをつなぐとは？	190
14.1.1 構成モデルとしてのカオス結合系	
14.1.2 情報処理機構としてのカオス結合系	
14.2 ● カオス結合モデル	191
14.2.1 COUPLED MAP LATTICE (CML)	
14.2.2 GLOBALLY COUPLED MAP (GCM)	
14.3 ● カオスの遍歴	198
14.4 ● カオス結合系と脳	200
14.4.1 カオスニューラルネットワーク	
14.4.2 カオスの脳観	
CHAPTER 15 内部観測	206
15.1 ● 観測について考え直す	207
15.1.1 遠くの「今」を知ることはできるか	
15.1.2 状態を指定するということ	
15.2 ● 局所的な要素と内部観測	208
15.2.1 物質の相互作用と伝播速度	
15.2.2 物質の内部観測	
15.3 ● 観測志向型理論	211
15.3.1 カルテジアンカット	
15.3.2 矛盾発生と擬似的解決	
15.3.3 インターフェースの無根拠性	
15.4 ● 内部観測による時間発展モデル	214
15.5 ● 創発とは矛盾を擬似的解決すること	215
15.6 ● 選択領域外部からの選択	216
15.7 ● 観測志向理論への道	219

PART V
『複雑系』研究への道標

221

CHAPTER 16 『複雑系』科学の鳥瞰図	222
16.1 ● 現在の『複雑系』科学再考	223
16.1.1 さまざまな「複雑さ」	
16.1.2 『複雑系』の理解に向けて	
16.2 ● 理解の新しい方法	225
16.2.1 創造的思考のための工夫	
16.2.2 思考実験の重要性	
16.3 ● 科学の枠が広がるか、それとも……	227
ホームページ&メーリングリスト	229
索引	230
謝辞	237