

まえがき

複雑系科学は従来の分析的科学で説明が難しいような複雑な現象を取り扱う。そのキーワードは自己組織化と創発性である。複雑系科学は、計算機科学、数学、物理学、生物学、経済学、社会学、心理学など多くの研究分野と関わりがあり、文理横断型の研究分野といえる。

本書では複雑系科学全般を紹介する。カオス、フラクタル、社会経済物理、ニューラルネットワークなど幅広い話題を解説するが、あまり詳細には踏み込まない。特に、本書の前半（4章まで）では文理横断型の学生への講義も念頭に置いて、自然科学概論的な内容も含めながら、できるだけ難しい数学を使わずに複雑系科学を説明する。第1章は全体のイントロダクションである。第2章、第3章で非線形科学のキーワードであるカオス、フラクタル、複雑ネットワークなどの解説を行う。第4章では生命現象の理解に複雑系の考え方を適用した例を紹介する。第5章以降の後半は微分方程式や確率を用いた少し高度な話題になっている。第5章は非線形微分方程式や分岐現象の入門で、後半の準備の章でもある。第6章、第7章では自己組織化臨界現象や集団運動などを解説し、著者達の研究もいくつか紹介する。第8章ではニューラルネットワークを概説する。

研究室の石橋和也君に草稿をチェックしてもらい、坂口将史君には一部の図を作成してもらった。「数理科学」の大溝良平氏、平勢耕介氏には編集でお世話になった。ここに、お礼を申し上げる。

2018年2月

坂口英継
本庄春雄

目次

第1章	イントロダクション	1
1.1	複雑系とは何か	1
1.1.1	自然科学と要素還元主義	1
1.1.2	システム論の系譜	3
1.1.3	非線形科学	4
1.1.4	散逸構造とBZ反応	5
1.1.5	複雑系	6
1.2	地球の歴史と地球環境	7
1.2.1	ビッグバン宇宙と星の一生	7
1.2.2	地球の歴史	8
1.2.3	地球の内部構造	9
1.2.4	地球内部のエネルギー源	10
1.2.5	太陽光エネルギーと温暖化現象	10
1.2.6	気候変動	11
1.3	対流と渦	13
1.3.1	流体と流れ	13
1.3.2	対流	13
1.3.3	渦	15
1.4	つながりとかたち	17
1.4.1	ネットワーク	17
1.4.2	階層構造と自律分散系	19
1.4.3	格子	20
1.4.4	パターン	21
	参考文献	22
第2章	複雑な動き	23
2.1	生命現象におけるリズム	23
2.1.1	リミットサイクル振動	23
2.1.2	活性因子-抑制因子系	23
2.1.3	サーカディアンリズム	24
2.1.4	呼吸と拍動のリズム	27
2.1.5	脳波	27

2.2	ポピュレーションダイナミクス	28
2.2.1	マルサス増殖	28
2.2.2	マメゾウムシ	29
2.2.3	ブナの実	32
2.2.4	カオスとバタフライ効果	33
2.3	オピニオンダイナミクス	33
2.3.1	平均場モデル	34
2.3.2	Galam のモデル	36
2.3.3	頑固者がいる場合	37
参考文献		38

第 3 章	複雑なパターン	39
3.1	フラクタル	39
3.1.1	フラクタル図形	39
3.1.2	一般的なフラクタル次元の求め方	41
3.1.3	分岐パターンとフラクタル	42
3.2	べき分布と経済現象	45
3.2.1	確率分布	45
3.2.2	べき分布	46
3.2.3	所得分布, 資産分布	47
3.2.4	時系列	49
3.3	複雑ネットワーク	51
3.3.1	ネットワークとグラフ	51
3.3.2	スモールワールドネットワーク	52
3.3.3	スケールフリーネットワーク	53
3.3.4	スケールフリーネットワーク上のダイナミクス	55
3.4	セルオートマトンと交通渋滞モデル	56
3.4.1	セルオートマトン	56
3.4.2	交通流	58
参考文献		60

第 4 章	生命現象と複雑系	61
4.1	人工生命	61
4.1.1	ライフゲーム	61
4.1.2	L システム	62
4.1.3	Tierra	64
4.1.4	合成生物学	64
4.2	進化とゲーム	65

4.2.1	生命の誕生と進化	65
4.2.2	共進化	67
4.2.3	生物の多様性	67
4.2.4	進化とゲームの理論	68
参考文献		72
第 5 章	非線形微分方程式	73
5.1	非線形微分方程式と分岐現象	73
5.1.1	微分方程式	73
5.1.2	線形微分方程式	74
5.1.3	非線形微分方程式の定常解と安定性	75
5.1.4	ピッチフォーク分岐	76
5.1.5	ホップ分岐	77
5.2	カオス	80
5.2.1	カオスとは	80
5.2.2	周期倍化分岐のカスケード	80
5.2.3	間欠性カオス	82
5.2.4	リヤプノフ指数	83
5.2.5	決定論的カオスを示すいくつかの簡単な写像	84
5.3	拡散と流れ	86
5.3.1	熱伝導方程式と拡散方程式	87
5.3.2	拡散方程式の解	88
5.3.3	反応拡散方程式	89
5.3.4	流体力学方程式	90
参考文献		92
第 6 章	協力現象とゆらぎ	93
6.1	相転移とイジングモデル	93
6.1.1	平均場のイジングモデル	93
6.1.2	正方格子上のイジングモデル	95
6.2	感染拡大の数理モデル	97
6.2.1	病気の感染の反応拡散モデル	97
6.2.2	病気の感染の確率モデル	99
6.2.3	スケールフリーネットワーク上のコンタクト・プロセス	100
6.3	確率過程とフラクタル	101
6.3.1	確率過程	101
6.3.2	自己回帰モデル	102
6.3.3	ランジュバン方程式と定常分布	103

6.3.4	乗算ノイズのランジュバン方程式	103
6.3.5	1/fゆらぎ	104
6.3.6	自己アフィン・フラクタル	106
6.4	自己組織化臨界現象と地震	109
6.4.1	砂山モデル	109
6.4.2	KPZ 方程式	110
6.4.3	ランダム界面成長での臨界状態の自己組織化	111
6.4.4	バネブロックモデルと地震	112
6.5	格差社会	114
6.5.1	Bonabeau のモデル	115
6.5.2	格差社会	116
6.5.3	乗法揺らぎの数理モデル	117
6.5.4	階層構造の自己組織化	118
参考文献		121

第 7 章 自己組織化 **122**

7.1	集団同期	122
7.1.1	同期現象	122
7.1.2	位相振動子の相互同期	123
7.1.3	集団位相振動	123
7.1.4	カオス同期	125
7.2	集団運動	126
7.2.1	自己駆動粒子	126
7.2.2	群れと集団運動	127
7.2.3	人間の集団行動	129
7.3	パターン形成	131
7.3.1	ベナール対流	131
7.3.2	反応拡散方程式とチューリングパターン	133
7.3.3	生体膜内に閉じ込められた反応	135
7.3.4	興奮系におけるパルス伝搬	137

参考文献 141

第 8 章 ニューラルネットワーク **142**

8.1	ニューラルネットワークと脳	142
8.1.1	脳とニューロン	142
8.1.2	マカロック-ピッツモデル	143
8.1.3	情報処理	144
8.1.4	ヘップ則	145

8.1.5	連想記憶モデル	145
8.2	学習と人工知能	148
8.2.1	パーセプトロン	148
8.2.2	小脳のモデル	149
8.2.3	逆伝搬学習	150
8.2.4	人工知能	152
8.2.5	深層学習	154
	参考文献	156
	索引	157