

# はじめに

数理工学がもてはやされる時代がやってきた。数理の隆盛を夢見ながら永年考究してきた私としては嬉しい限りである。戦後の耐乏生活から、日本の経済の復興発展の時期、さらに失われた30年という沈滞の時期を、私は過ごした。またとない激動の時代を生きたわけであり、これだけでも幸運であるのに、さらに数々の運に恵まれて今日を迎えることができた。

長年の研究生活を振り返り、その時々のお想いを記してみたいと考えていた。とくに情報幾何学、AIと深層学習、それに数理脳科学を中心に私の65年を超える数理の研究生生活を、その時々のお時代背景と意気込みを中心にして、独白的に語ることである。こんな勝手な試みをサイエンス社は許してくれた。

私の考究した理論に多くの紙数を割いたが、正直に言ってこれはなかなか難しかった。でもある程度わかるように書かなければいけない。読者はこの部分を読み飛ばして、一研究者の人生を鑑賞していただければよい。

こんなわけで、本書は少し変わっている。まず、引用文献を省略した。これは、いまでは文献検索でいくらでも得られるからである。その代わりに、私の英文の発表論文をかなり網羅した文献、著書の一覧をつけさせていただいた。本書の執筆中に米寿を迎えたが、執筆は楽しかった。

本書の執筆を激励してくださったサイエンス社、とくに高橋良太さんには細部に至るまで丁寧なご指摘をいただいた。また、毎度のことながら理化学研究所の浪岡恵美さんには、 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ の打ち込みなど原稿の作成で大変お世話になった。ここに感謝の気持ちを篤く記したい。

2024年9月

甘利俊一

# 目 次

<b>第 1 章 数理工学への入門——大学院時代</b>	<b>1</b>
1.1 数理工学の門を叩く	1
1.2 数理コースは苦闘する	2
1.3 自由な世界	3
1.4 電気回路網のトポロジー——ホモロジー, コホモロジーと双対性	4
1.5 連続体力学——非リーマン塑性論	14
1.6 信号空間の情報理論	28
1.6.1 情報通信の理論へ	28
1.6.2 確率分布族とリーマン空間	30
1.6.3 変調と複調	31
こぼれ話 1 近藤一夫小伝	33
こぼれ話 2 コンピュータと私	37
<b>第 2 章 AI 研究と数理脳科学の原点——九州大学時代</b>	<b>38</b>
2.1 自由の天地 九州大学	38
2.2 機械学習——確率的勾配降下法の始まり	40
2.2.1 アナログパーセプトロンと中間層のニューロンの学習	46
こぼれ話 3 深層学習の起源	52
<b>第 3 章 東京大学へ——激動の時代：神経回路網の数理</b>	<b>53</b>
3.1 東京大学へ戻って	53
3.2 統計神経力学の始まり	57
3.3 神経集団の力学	64
3.4 統計神経力学の基礎	66
3.5 連想記憶モデル	69
3.6 初めてのアメリカ	77
3.7 神経場のパターン力学	81
3.8 神経回路網の自己組織化	86
3.9 神経場の自己組織化	92
3.10 統計神経力学	99

こぼれ話 4 外国旅行の思い出	102
<b>第 4 章 情報幾何の始まりと展開</b>	<b>107</b>
4.1 情報幾何のできるまで	107
4.2 確率分布族のなす空間——リーマン空間と双対接続	110
4.3 ダイバージェンスと情報幾何	117
4.4 双対平坦空間と Bregman ダイバージェンス	120
4.4.1 Bregman ダイバージェンス	120
4.4.2 ルジャンドル変換	121
4.4.3 双対平坦空間	122
4.5 統計的推論の高次漸近理論	126
4.5.1 指数型分布族	126
4.5.2 指数型分布族における推定	128
4.5.3 曲指数型分布族における推論	130
4.6 検定の高次漸近理論	136
4.7 高次漸近理論は有効か、最尤推定は最良か?	138
4.8 時系列と線形システムの情報幾何	139
こぼれ話 5 長岡浩司の幻の論文	147
こぼれ話 6 ロシアの科学と私	148
こぼれ話 7 秘書列伝	149
<b>第 5 章 世界への進出——ニューロブーム、バブル期とその崩壊</b>	<b>151</b>
5.1 第 2 次ニューロブームの到来	151
5.2 学界の国際政治の暗部	152
5.3 ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム	154
5.4 リアルワールドコンピューティング計画	156
5.5 文部省の重点研究	157
5.6 Boltzmann 機械と情報幾何	158
5.7 機械学習	166
5.8 局外母数のある統計モデルと Neyman-Scott 問題：セミパラメ トリック確率モデルの幾何	167
5.8.1 局外母数のある統計モデルと推定関数	167
5.8.2 推定関数	171

5.8.3	Neyman-Scott 問題	172
5.8.4	セミパラメトリックモデルの情報幾何	174
5.9	比例係数の問題	180
5.10	神経パルス列の発火特性	182
こぼれ話 8	京都賞	185
こぼれ話 9	私を超えていった研究者：川人光男と合原一幸	186
こぼれ話 10	白タク事件	188

## 第 6 章 理化学研究所——研究者の天国 190

6.1	理化学研究所へ	190
6.2	独立成分分析と情報幾何	193
6.2.1	独立成分分析とは	193
6.2.2	主成分分析	194
6.2.3	独立性の基準と勾配学習	196
6.2.4	非ホロノーム基底と非ホロノーム束縛	201
6.2.5	ICA のセミパラメトリック統計モデル	204
6.2.6	時間相関を利用した推定関数	207
6.3	神経スパイクの高次相関と階層モデルの情報幾何	209
6.3.1	神経集団の発火パターン	209
6.3.2	高次階層モデルの混合座標系	211
6.3.3	神経発火パターンの高次相関	213
6.3.4	高次相関を発生する仕組み	215
6.4	自然勾配学習法	219
6.4.1	パーセプトロン空間の自然勾配	219
6.4.2	自然勾配学習法は Fisher 有効な推定である	222
6.4.3	多層パーセプトロン空間の特異構造	223
6.4.4	特異領域の近傍で何が起ころのか——Milnor アトラクタとその消失	225
6.4.5	$G^{-1}$ の近似法	228
6.4.6	深層回路の特異点と代数幾何	229
6.5	センター長時代——管理の仕事	230
6.5.1	センター長を務めて	230
6.5.2	理研-MIT と利根川センター長	232

6.5.3	数理科学の振興	233
6.5.4	その他の出来事	235
6.6	情報統合と意識の情報幾何	238
	こぼれ話 11 研究者倫理と盗作疑惑あれこれ	243
<b>第7章 研究は私の趣味——退官後の研究</b>		<b>245</b>
7.1	統計神経力学	245
7.1.1	大規模ランダム階層神経回路の情報変換——順方向と逆方向の双対的な構造	245
7.1.2	誤差逆伝播	249
7.1.3	Fisher 情報行列と自然勾配学習法	251
7.1.4	経験 Fisher 情報行列とカーネル	253
7.1.5	神経接核理論	255
7.2	Wasserstein 情報幾何	266
7.2.1	Wasserstein 幾何と情報幾何	266
7.2.2	エントロピー正則化 Wasserstein 距離	268
7.2.3	Wasserstein 統計学	272
7.2.4	アフライン変形モデル	277
7.2.5	Wasserstein 有効性	281
7.2.6	情報幾何の今後	282
7.3	3層パーセプトロンの学習と Wasserstein 幾何	283
7.4	未解決の問題——多端子統計推論	287
	こぼれ話 12 甘利一族	289
	<b>あとがき</b>	<b>293</b>
	<b>文献一覧</b>	<b>295</b>
	<b>索引</b>	<b>317</b>