

まえがき

本書の目的は、近年発展のめざましい非平衡統計力学について、基礎から最先端までの道案内をすることである。1990年代の終わりごろから、「ゆらぎの熱力学 (stochastic thermodynamics)」と呼ばれる分野が展開しており、非線形非平衡領域にも適用できる統計力学の理論が構築されつつある。また技術の進歩により、生体分子モーターから量子ドットまで、マイクロなスケールの多彩な熱機関が実験的に研究されるようになってきた。このような研究の流れは、生物物理や量子情報理論などの他分野ともクロスオーバーしながら、非常に活発な研究分野を形成している。

特に注目すべきことは、現代の非平衡統計力学において情報理論が中心的な役割を果たすようになってきていることである。情報エントロピーが非平衡熱力学エントロピーの役割を果たすことが明らかになっただけでなく、より深いレベルで情報と熱力学を対等に扱う「情報熱力学 (information thermodynamics)」と呼ばれる研究領域が生まれてきた。これは19世紀以来の「マクスウェルのデーモンのパラドックス」という基礎物理の原理的な問題に現代的な光をあてるだけでなく、情報と仕事や自由エネルギーをいかにして相互変換することができるかといった最先端の技術とも結びついている。いまや情報の概念ぬきで非平衡統計力学を語れないと言っても過言ではないであろう。

本書ではこのような現代の非平衡統計力学の展開を、物理学科の2, 3年生程度の熱力学と統計力学の知識のみを前提として解説していくことを目標とする。熱力学第二法則やゆらぎの定理など中心的な概念について解説し、さらに熱力学不確定性関係など最先端の話題も盛り込んだ。本書で特に力を入れたのは情報熱力学のパートである。情報と熱力学量を対等に扱う現代的な理論を議論すると同時に、できるだけ多くの具体例（トイモデル）を示しながら、基本的な

概念を明確にすることを心掛けた。

なお、本書を読むうえで情報理論の予備知識は必要なく、付録 A で情報理論入門の自己完結的な解説を試みた。さらに付録 B では、ランジュバン方程式のできるだけ自己完結的な解説も試みている。また、節末などにあるいくつかの「囲み記事」で、補足的な話題や最先端の研究トピックを取り上げた。

本書が、学部生をはじめとした初学者のみならず、生物物理などの周辺分野も含めた大学院生や研究者の方々にとっても役に立つ手引きになれば幸いである。また、題材を多少取捨選択することで、およそ 1 セメスター分の講義にも用いることができると考えている。

ところで、本書で扱う内容のいくつかには、背後に美しい情報理論的・数学的構造がある。しかし本書ではそこまでは立ち入らず、できるだけ初等的な定式化を採用することにした。また、本書では扱う対象を古典系に限定し、量子系には触れていない。より数学的な内容や量子系の場合に興味のある読者は、拙著 [32] をご一読いただけると幸いである。

本書の執筆にあたって貴重なコメントをいただいた方々に、この場を借りて深く御礼申し上げたい：岡田康志氏、齊藤圭司氏、鳥谷部祥一氏、伊藤創祐氏、金澤輝代士氏、川口喬吾氏、田島裕康氏、布能謙氏、白石直人氏、上島卓也氏、矢田季寛氏、坪内健人氏、そして福澤治幸氏をはじめ岡田康志研究室の学生の皆さん。

本書の執筆は、新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」からのサポートを受けて行われた (JSPS KAKENHI Grant Number JP19H05796)。特に本書の内容のうち情報熱力学に関する部分は、2019 年 10 月に沼津で行われた新学術領域会議での著者によるチュートリアル講演に基づいている。領域代表の岡田康志氏をはじめ、ご助力いただいた方々に感謝したい。

2022 年 5 月

沙川貴大

目 次

第 1 章	イントロダクション	1
1.1	ゆらぎの熱力学	2
1.2	情報熱力学	6
1.3	シラード・エンジンと情報熱機関	7
第 2 章	非平衡系の熱力学第二法則	15
2.1	ゆらぐ熱力学系の定式化	15
2.2	熱力学エントロピーと情報エントロピー	17
2.3	非平衡ダイナミクス	20
2.4	エントロピー生成と熱力学第二法則	24
2.5	熱力学的可逆性	32
第 3 章	ゆらぎの熱力学	37
3.1	ゆらぎの定理	39
3.2	不可逆熱力学の枠組み	51
3.3	ゆらぎの定理から線形応答理論へ	60
3.4	マルコフジャンプ過程	65
3.5	非平衡定常熱力学	76
3.6	熱力学不確定性関係	80

第4章 情報熱力学 91

4.1 フィードバックと第二法則	91
4.2 測定に要する仕事	100
4.3 情報交換における第二法則	107
4.4 メモリの構造	111
4.5 自律的なマクスウェルのデーモン	127

付録 A 情報理論入門 137

A.1 シヤノン情報量	137
A.2 相互情報量	140
A.3 カルバック・ライブラー (KL) 情報量	146
A.4 フィッシャー情報量	151
A.5 モーメントとキュムラント	153

付録 B ランジュバン系 155

B.1 伊藤公式とフォッカー・プランク方程式	155
B.2 ランジュバン系の熱力学	165

参考図書 173

索引 181