

戦略プロポーザル

情報・物理・数理の共創

～非平衡ダイナミクスの理解が見せる新たな景色～

STRATEGIC PROPOSAL

Co-creation of Information Science, Physics and Mathematics

-Novel landscapes from the understanding of
non-equilibrium dynamics-

エグゼクティブサマリー

情報学や計算機科学と物理学との関係の深化が注目されている。情報処理のエネルギー効率と物理法則との関係はこれまでも長らく議論されてきたが、近年では物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する方向と、情報学・計算機科学の概念・手法から物理法則を理解するという方向の双方向の交流が理論・実験の両面で活性化している。

本プロポーザルでは、情報学・計算機科学と物理学を橋渡しするような学際的研究を進め、萌芽期にあるこの研究開発領域の成長と物理学・情報学におけるブレークスルーを目指し、以下3つの研究開発課題を提案する。

- (1) 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する
- (2) 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する
- (3) 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する

物理の視点で見るとコンピュータは非平衡系であり、有限時間での熱力学的な状態遷移といえる計算のエネルギー効率の限界を扱うには理論枠組みまで立ち戻る必要がある。物理学上の新概念や新発見が新たな計算原理や新デバイスなどとしてブレークスルーにつながる可能性も高く、本研究開発領域の波及効果は基礎物理にとどまらず、量子技術から生命科学まで多岐にわたる。情報学・計算機科学のフロンティア拡大は、人材育成の面からも長期的なITの発展に欠かせない。さらに、この研究開発によって生まれる学理基盤やツールは幅広い分野に波及し、低消費電力の計算やセキュアな情報処理として社会的課題の解決にも貢献が期待しうる。

国は基盤技術の研究開発と整備に加えて、新しい研究開発領域を担う人材・組織の育成やコミュニティの醸成などにも取り組む必要がある。本プロポーザルでは以下3つの推進方法を提案する。

- (1) 先導的研究会の設立・運営の支援
- (2) 国際的研究センターの構築
- (3) 長期的視点のプロジェクト

本研究開発領域は萌芽的な状況であり、国際的にも研究コミュニティが分かれている。そのため、まずは数理・情報と物理の間、量子情報と統計力学の間など、分野やコミュニティを跨がって問題意識の共有や議論が行える場が必要である（先導的研究会の設立・運営の支援）。また、このような議論を効果的・効率的に行うには、物理的に同じ場所にあつまることも大事な要素と考えられる。ワークショップや研究会として一時的に顔をあわせるだけでなく、特定の研究機関や組織に共通の帰属意識を持った中での議論醸成が望ましい（国際的研究センターの構築）。加えて、基礎的に重要な研究は1～3年程度の短期間では成果があらぬ場合が多い。分野をまたがる融合的な研究の場合にはさらに時間が必要と考えられる。5年の任期で研究を進め、特に問題がなければ無条件に更新して10年程度までは継続できるようなポジションが望まれる（長期的視点のプロジェクト）。

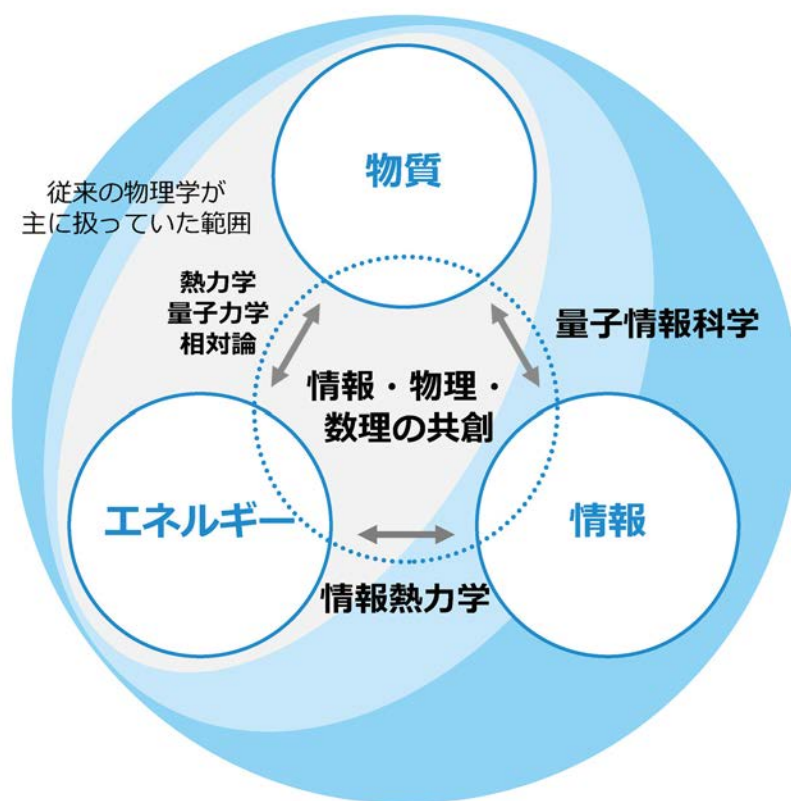


図1 「情報・物理・数理の共創」と物質・エネルギー・情報

Executive Summary

The deepening relationship between informatics, computer science, and physics is drawing attention. The relationship between the energy efficiency of information processing and the laws of physics has been debated for a long time. Two-way exchanges in the direction of understanding the laws of physics from methods are becoming active in both theory and experiment.

In this proposal, we will promote interdisciplinary research that bridges informatics/computer science and physics, aiming for growth in this emerging field and breakthroughs in physics/informatics. suggest.

- (1) Applying concepts and methods of physics to informatics and computer science
- (2) Apply concepts and methods of informatics and computer science to physics
- (3) Mathematics that connects physics and informatics/computer science

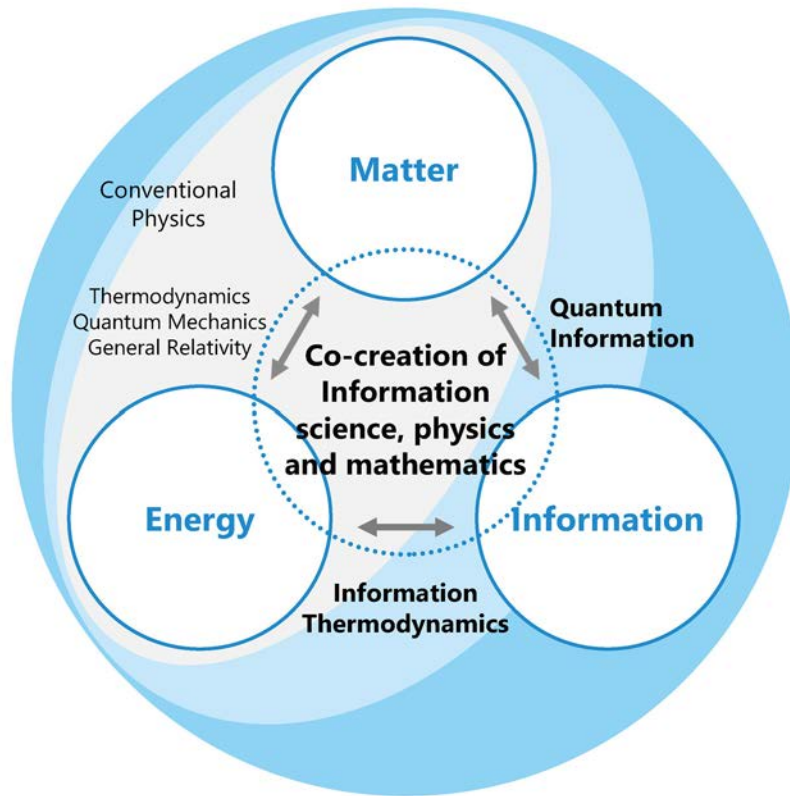
From the point of view of physics, a real computer is a non-equilibrium, open system, and it is necessary to go back to the theoretical framework to deal with the limits of energy efficiency. New concepts and discoveries in physics are highly likely to lead to breakthroughs in the form of new computational principles and new devices. Expanding the frontiers of informatics and computer science is essential for the long-term development of IT from the perspective of human resource development. Furthermore, the academic foundations and tools created by this research and development will spread to a wide range of fields, and are expected to contribute to the resolution of social issues through low power consumption calculations and secure information processing.

In addition to the research and development and maintenance of basic technologies, the government needs to work on developing human resources and organizations that will lead new fields and fostering communities. This proposal proposes a promotion method from the following three aspects.

- (1) Establishment of a leading research group
- (2) Building an international research center
- (3) Long-term project

This research and development area is in an embryonic state, and research communities are divided internationally. Therefore, first of all, we need a place where we can share awareness and discuss issues across fields and communities, such as between mathematics/information and physics, between quantum information and statistical mechanics. Also, in order to conduct such discussions effectively and efficiently, it is considered to be an important factor to physically gather in the same place. It is desirable not only to meet temporarily at workshops and research groups, but also to foster discussion within a shared sense of belonging to specific research institutes and organizations. In addition, fundamentally important research often does not

produce results in a short period of one to three years. More time may be needed for interdisciplinary research. It is desirable to have a position that allows research to proceed for a five-year term and can be renewed unconditionally for up to ten years if there are no particular problems.



☒ 2 Co-creation of Information science, physics and mathematics

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	3
	2.1 現状認識と問題点	3
	2.2 社会・経済的効果	15
	2.3 科学技術上の効果	17
3	具体的な研究開発課題	20
	3.1 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する	21
	3.2 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する	26
	3.3 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する	30
4	研究開発の推進方法および時間軸	34
	4.1 推進上の課題と推進方策の時間軸	34
	4.2 先導的研究会の設立・運営の支援	35
	4.3 国際的研究センターの構築	36
	4.4 長期的視点のプロジェクト	39
	付録 A 検討の経緯	42
	A.1 インタビュー	42
	A.2 科学技術未来戦略ワークショップ「情報と計算の物理と数理」.....	43
	付録 B 専門用語説明	44
	参考文献	48

1 | 研究開発の内容

ターゲット・ビジョン

情報学や計算機科学と物理学との関係の深化が注目されている。情報処理のエネルギー効率が物理法則から逃れられないことは、ランダウア原理などの形でこれまでも長らく議論されてきた^[1-4]。最近では、量子情報の考え方で量子重力を扱うことで、私たちの宇宙（時空）そのものが量子ビット上の情報から創発する“it from qubit”という考え方も登場した^[5, 6]。このように、物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する方向（information is physical）と、情報学・計算機科学の概念・手法から物理法則を理解するという方向（physics is informational）の2つの方向での交流が活性化している。これらの発展を支えているのは、熱ゆらぎエネルギースケールでのフィードバック制御^[7]や単電子エレクトロニクス^[8, 9]、量子多体系の制御技術^[10-12]など様々な実験手法の進展である。

本プロポーザルでは、情報学・計算機科学と物理学を橋渡しするような学際的研究を進め、萌芽期にあるこの研究開発領域の成長を目指す。物理の視点で見るとコンピュータは非平衡系であり、有限時間での熱力学的な状態遷移といえる計算のエネルギー効率の限界を扱うには理論枠組みまで立ち戻る必要がある。物理学上の新概念や新発見が新たな計算原理や新デバイスなどとしてブレークスルーにつながる可能性も高く、本研究開発領域の波及効果は基礎物理にとどまらず、量子技術から生物まで多岐にわたる。情報学・計算機科学のフロンティア拡大は、人材育成の面からも長期的なITの発展に欠かせない。さらに、この研究開発によって生まれる学理基盤やツールは幅広い分野に波及し、低消費電力の計算やセキュアな情報処理として社会的課題の解決にも貢献が期待できる。

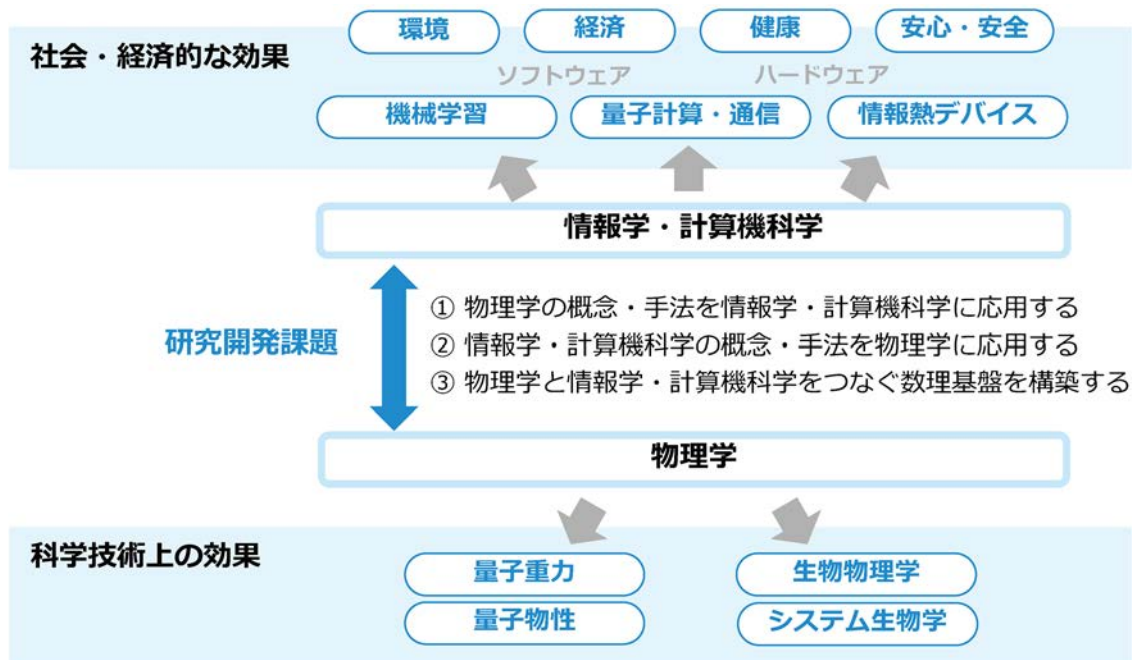


図1-1 本プロポーザルの概要

具体的な研究開発課題

非平衡ダイナミクスにおける「情報」の概念の重要性に焦点を当て、以下の研究開発課題を提案する。

- (1) 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する
- (2) 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する
- (3) 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する

「(1) 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する」は「物理学」から「情報学・計算機科学」に向かうベクトルを、「(2) 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する」はその逆のベクトルとして表される研究開発テーマである(図1-1)。そしてこれらの橋渡しを支える土台が「(3) 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する」である。表1-1に具体的な研究開発課題をまとめた。

表1-1 研究開発課題

(1) 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する	(2) 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する	(3) 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する
<p>1a) 情報熱力学による計算エネルギー効率の解明 情報熱力学第二法則、速度限界、熱力学的不確定性関係、ゆらぎの熱力学</p> <p>1b) 非平衡統計力学の機械学習への応用 高次元機械学習モデル、ボルツマン機械、生成モデル、量子アニーリング</p>	<p>2a) 量子情報理論の熱力学への応用 リソース理論、固有状態熱化仮説、量子熱力学、ブラックホール情報喪失問題、量子機械学習、Lieb-Robinson限界</p> <p>2b) 量子情報理論の量子物性への応用 テンソルネットワーク、トポロジカル量子相、測定誘起相転移、非平衡量子系</p>	<p>3a) 微分幾何の展開 情報幾何学、最適輸送とワッサースタイン幾何学、深層学習の数理、量子情報幾何学</p> <p>3b) 位相幾何の応用 流体力学極限、コホモロジー、トポロジカル量子計算、トポロジカルデータ解析、ベイズ学習、Lie群の作用</p> <p>3c) 非可換幾何の発展 コンヌ埋め込み問題、圏論、作用素環の表現論、再生ヒルベルト核、制御理論・最適化</p>

推進方法

本プロポーザルでは「先導的研究会の設立・運営の支援」「国際的研究センターの構築」「長期的視点のプロジェクト」の3つの側面から推進方法を提案する。

本研究開発領域は萌芽的な状況であり、国際的にも研究コミュニティが分かれて研究されている。そのため、まずは数理・情報と物理の間、量子情報と統計力学の間など、分野やコミュニティを跨がって問題意識の共有や議論が行える場が必要である(先導的研究会の設立・運営の支援)。また、このような議論を効果的・効率的に行うには、物理的に同じ場所に集まることも大事な要素と考えられる。ワークショップや研究会として一時的に顔を合わせるだけでなく、特定の研究機関や組織に共通の帰属意識を持った中での議論醸成が望ましい(国際的研究センターの構築)。加えて、基礎的に重要な研究は1~3年程度の短期間では成果があがらない場合が多い。分野をまたがる融合的な研究の場合にはさらに時間が必要と考えられる。5年の任期で研究を進め、特に問題がなければ無条件に更新して10年程度までは継続できるようなポジションが望まれる(長期的視点のプロジェクト)。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識と問題点

(1) 情報と物理

情報学や計算機科学と物理学との関係の深化が注目されている。情報と物理の間の密接な関係は、前世紀からずっと指摘されてきた。ランダウアの「情報は物理的 (information is physical)」という言葉に示される通り、それまでの物理学が対象としてきた「物質」「エネルギー」に加えて「情報」も物理法則に従うと考えるのである (図2-1)。実際、「情報」はメモリなど物理的な実体をもつデバイスに蓄えられ、トランジスタ中の電子の分布という熱力学状態の遷移によって計算が進むものなので、情報処理が物理法則から逃れられないことは定性的には理解できる。ランダウアはこれをエントロピーを用いて定式化し、情報処理のエネルギー効率が熱力学第二法則により制限されることを導いた (ランダウア原理)^[1-4]。統計力学や量子力学のアイデアが機械学習や最適化などの分野で生かされる場面も多い。例えば、ニューラルネットワークを用いた機械学習はスピングラスなどランダム系の統計力学で伝統的に扱われてきたテーマであり^[13]、深層ニューラルネットワークの理論解析に平均場理論やレプリカ法など物理学の手法・ツールが有効だと知られている^[14-16]。これらはいずれも、物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に取り入れる方向の流れとまとめられる。

近年では、情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に取り入れる流れも活発化している。これは先述した流れと逆の「物理は情動的 (physics is informational)」とも言える流れである。現代物理学において「情報」の概念はさまざまな場面で顔を出し、興味ある状態の記述やメカニズムの理解にしばしば重要な役割を果たす。例えば、情報理論と非平衡統計力学の融合により、情報量を熱や仕事などの熱力学量と対等に扱う「情報熱力学」^[17]の枠組みが確立し、情報処理に必要なエネルギーの原理的限界の解明や新たな省エネルギーデバイスの設計などに結びつくことが期待されている^[18]。また、情報を幾何学の視点から考える「情報幾何」は統計モデルの情報量や推定量の有効性などの幾何的理解を通して人工知能や機械学習などに貢献^[19, 20]してきただけでなく、熱力学・統計力学^[21]や量子情報科学^[22]にも大きな影響を与えている。

量子コンピュータや量子暗号・量子通信への応用を中心に発展してきた「量子情報理論」^[23-25]は、そのアイデアやテクニックを量子物性や量子重力^[6]など物理学の様々な分野との融合でさらなる発展を遂げようとしている^[26]。ここでのキーワードは量子力学的な非局所的相関を意味する「エンタングルメント (量子もつれ)」で、量子計算や量子通信の実現に不可欠だけでなく、物性物理における量子多体系やその量子相転移の効果的な表現・解析手法でもある^[27-29]。また重力理論の幾何学的性質にエンタングルメントを結びつける「笠-高柳公式」など、量子重力理論や超弦理論の基礎的理解にも量子情報理論が有効であると分かってきた^[6]。ホーラーの「全ての存在は情報から生じる (it from bit)」の言葉を受けた「時空は量子ビットから創発する (it from qubit)」^[5]という考え方も登場し、基礎物理学における根本的な問題への新たなアプローチ方法として期待されている^[30]。

このように、物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する方向と、情報学・計算機科学の概念・手法から物理法則を理解するという双方向の交流が活性化しており、今後の発展が期待できる。

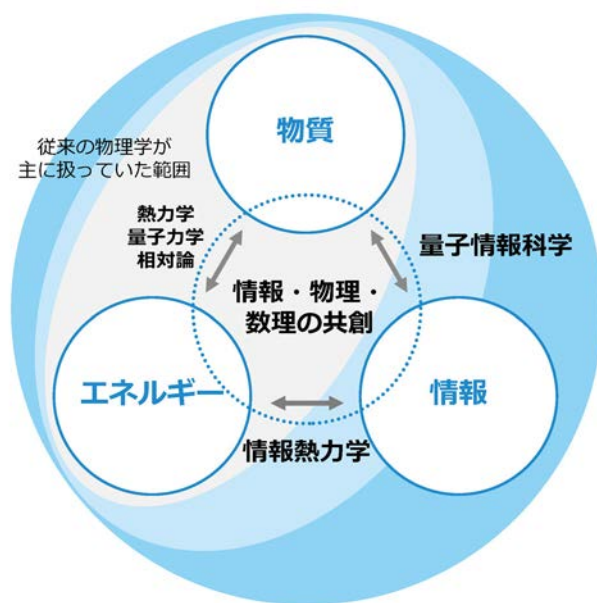


図2-1 物質・エネルギー・情報

(2) 熱力学とコンピューティング

情報学と物理学、とりわけ熱力学との関係についての研究の歴史は古く、19世紀まで遡ることができる。19世紀末に定式化されたボルツマンの公式「 $S = k_B \log W$ 」はマクロな熱力学量であるエントロピー S と統計力学での系のミクロな状態数 W と結びつける (k_B はボルツマン定数) 最も基本的な式である。この従来の熱力学が対象とする系は主に熱平衡状態であるため (コラム参照)、一般には平衡状態にない計算機システムの動作と熱力学は無関係だと見なされることも多い。また、熱力学はすべて1世紀以上も前の学問で、新たに学ぶことは何もないように思われることもあるが、これらの認識は真実とはかけ離れている。

あまり評価されていないことの一つに、熱力学とコンピューティングの概念的基礎が同じ時期に同じ研究者によって研究され、一方の領域の進歩が他方の領域の進歩を刺激することも多かったということが挙げられる。例えば、情報理論の父と呼ばれるシャノンは、情報システムの不確実性を説明するために熱力学から「エントロピー」という用語を借りた。今日のコンピュータの基礎を作り上げた人物としてしばしば挙げられるフォン・ノイマンも、量子力学の数学的な基礎を確立したことで物理学上も重要な人物であり、統計力学におけるギブスエントロピーの量子拡張であるフォン・ノイマンエントロピーにその名を残している。不可逆的な論理演算に関するランダウアの独創的な研究は「マクスウェルのデーモン (悪魔)」として古くから知られる熱力学的パラドックスにその起源をもつ。表2-1に物理学と情報学・計算機科学の歴史の部分的な年表を示した。本プロポーザルの狙いは、このような双方向の交流を進め、物理学と情報学・計算機科学の双方にとって新しい展開を生み出す機会を創出することである。

情報と物理学を結びつけるきっかけを与えたのは1867年のマクスウェルによる思考実験である。マクスウェルは気体分子を1個ずつ観測・操作できる「デーモン」が存在すれば、仕事をすることなく熱力学系のエントロピーを減らすことができ、熱力学第二法則が破れるかもしれないと考えた。このデーモンと熱力学第二法則の整合性については長らく思考実験を中心に議論が続けられてきたが、21世紀に入ってゆらぎの熱力学^[31-33]に基づく一般的な理論が構築され、現在ではパラドックスではなくなっている^[18]。現代風に言えば、マクスウェルのデーモンは熱ゆらぎのエネルギースケールで対象の系を測定し、その結果に基づき系にフィードバック制御を行うミクロなデバイスである。このとき、デーモンが測定によって得た情報のエントロピーと熱力学的なエントロピーの両方を考慮すると、熱力学第二法則を破らないと理解できるのである。

近年、急速に発展している非平衡系の熱力学・統計力学における重要なトレンドは少数自由度のミクロな

系の熱力学の研究である。従来の熱力学が対象としてきたのは主にマクロな系であり、物理量のゆらぎは無視できるほど小さいと仮定される。ミクロな系ではこの熱ゆらぎの影響は無視できず、物理量が激しくゆらいでいる状況での熱力学を考える必要がある。実際にこのような状況にある系としては、ブラウン運動するコロイド粒子や生体内の分子モーターなどが挙げられる。こうしたミクロな系でのゆらぎはランダムに振る舞うように思われるが、実はさまざまな普遍的関係式を満たすことが分かっている。中でも最も大きな発見はエントロピー生成の普遍的な性質である「ゆらぎの定理」^[31, 32]であろう。ゆらぎの定理は、熱力学第二法則や揺動散逸定理などを導出できる普遍的な関係式で、非平衡統計力学にブレイクスルーを与え、先述したとおりマクスウェルのデーモンの現代的な視点からの解釈にも成功した。

ゆらぎの熱力学の考え方をを用いて情報量を熱や仕事などの熱力学量と対等に扱う熱力学の枠組みは「情報熱力学」という新しい研究領域の確立に結びついた^[17]。情報熱力学により、これまで平衡状態に対してだけ定義されていた熱力学エントロピーを非平衡状態にも使えるように拡張した「情報エントロピー（シャノンエントロピー）」が導入され、熱力学第二法則は情報量を含む形に一般化された。情報熱力学により示された情報エントロピーと非平衡熱力学エントロピーの等価性は、マクスウェルのデーモンという物理学の原理的問題に現代的な光をあてただけでなく、情報とエネルギー（仕事や自由エネルギー）の相互変換という新しいデバイスや計算原理とも結びついている。実際、熱ゆらぎエネルギースケールでの測定・フィードバック制御が可能な実験手法が進展し、コロイド粒子を用いた実験^[7]や単電子デバイスを用いた実験^[8, 9]など、マクスウェルのデーモンはもはや思考実験上の存在ではなくなった。情報の概念抜きでは非平衡統計力学を語れないのと同時に、非平衡統計力学抜きには情報処理を語れないと言える。このような非平衡系の熱力学・統計力学の最近の理論的進歩を計算を結び付けることは、本質的に新しい計算原理や低エネルギーの情報処理デバイスの設計指針などを生み出す可能性がある。

(3) 量子情報の発展

量子情報科学は、量子力学、計算機科学、情報理論、計算複雑性などを含む物理と情報にまたがる学際的な融合分野である。エンタングルメント状態における非局所相関などの量子論特有の現象について理論・実験的にアプローチする物理学的な研究と、その結果を通信や情報処理に応用する工学的な研究の両面を持つ分野である。主要な研究テーマには量子コンピュータ、量子暗号鍵配送、量子通信、量子センシングなどが挙げられる。

量子情報とは、量子状態がもつ情報（および量子状態そのもの）を指す言葉だが、現在ではその操作による情報処理までを含む量子情報科学・工学分野を現す言葉として用いられることも多い。

量子力学は微視的なレベルでの物質の特性を扱うが、量子情報科学はそれらの特性にエンコードされた情報を扱う情報科学である。量子計算は、このような量子情報を操作・処理することで論理演算を実行することにほかならない。情報を取得する最も基本的な方法は測定（観測）だが、不確定性原理により非可換な2つの物理量を同時に正確に測定することはできないことが量子系から取り出しうる情報量に古典情報理論とは異なる制約を与えている。古典情報理論におけるシャノンエントロピーに対応し、量子情報理論では密度行列のフォン・ノイマンエントロピーを情報量の基本的な尺度として用いる^[22, 25]。

情報理論からの発展としてみると、量子情報科学はシャノンの情報理論の体系に量子力学の基本原則を統合する、いわば情報理論の量子拡張のような形で1963年ごろにその萌芽的な研究が行われた。20年以上にわたる精力的な研究により、量子力学的な媒体による通信や信号処理の効率と限界が明らかになり、実現化への指針を与える量子通信理論の体系化に結びついた。1980年代には不確定性原理を用いて通信の安全を物理法則が保証するという量子暗号鍵配送が発明された（BB84プロトコル）。

また、量子情報における重要な概念のひとつがエンタングルメント（量子もつれ）である。エンタングルメントは古典系では実現できない量子力学特有の相関で、量子計算や量子通信など量子情報処理の本質的なソースだと考えられている。エンタングルメントを使うと特殊相対性理論の光速不変の原理に一見反するか

のような状況を作り出せるため、量子力学の黎明期には重大な欠陥として論じられたが現在では解決されている（=超光速の情報伝達はできない）。このパラドックスは長らく思考実験として議論されてきたが、「ベルの不等式」（CHSH 不等式）として実験検証できる形に一般化され、ついにはアスペらによりベル不等式の破れも実験検証された（2022年のノーベル物理学賞の対象にもなった）。

1980年代には計算機科学の側面からのアプローチも活発化し、量子力学と計算の効率性の関係に注目が集まった。ベニオフは量子力学の原理に基づいて古典コンピュータと同じ計算を行えることを示し、ファインマンは古典コンピュータでは指数関数的な時間がかかる量子系のシミュレーションを量子力学に基づいて動作するコンピュータで効率的に行える可能性を示した。「量子計算」の生みの親ともいえるドイチュは重ね合わせの原理によってある種の並列計算が実現できると考えた。ドイチュにより定式化された量子チューリングマシンは、通常のチューリングマシンとほぼ同じ構造の計算モデルだったため、物理学者だけでなく、多くの計算機科学者が量子コンピュータに注目するきっかけとなった。量子チューリングマシンはチューリングマシンと計算可能性の点では等価であり、チューリングマシンの任意の動作をプログラムにより模倣できる（万能性）。

量子情報科学が注目されている理由は主に2つ挙げられる。コンピュータの性能の飛躍的向上と、長期にわたって安全性を保つ情報セキュリティの実現である。量子情報科学や量子技術の世界的な開発競争が加速し、政府研究開発投資や民間企業による研究開発への参入も進んでいる。量子技術はAIやインターネットなど現代のITと組み合わせられることで、私たちの暮らしを豊かにし、大きな変革をもたらすと期待されている。

また、これらの社会・経済的課題の解決に加え、量子情報は新しい学術分野の誕生にも貢献すると期待されている。エンタングルメントや量子計算等の量子情報理論の概念を量子物性や量子重力に応用する研究潮流が世界的に活性化しており、大きなインパクトを持つ成果も上がり始めている。量子物性への応用では、量子計算複雑性と物質の新たな量子相の特徴づけとの関係、量子誤り訂正符号とトポロジカル物質中のマヨラナ粒子など量子情報的な考え方や手法はこの10～20年間の量子物性理論の発展に大きな影響を与えてきた^[27]。実験による検証は少し先となるものも多いが、多くの実験家が中長期的に掲げるターゲットとなるようなテーマに繋がっている。量子重力への応用では、エンタングルメントエントロピーを用いて超弦理論と量子情報理論の関係性を深化させた「笠一高柳公式」の発見や、量子テレポーテーションや量子誤り訂正符号を用いたブラックホール情報喪失問題へのアプローチなどが注目されている^[6, 30]。

(4) コンピューティングの現状

情報熱力学や量子情報に注目が集まる理由のひとつは、現在の計算機の性能の原理的な限界を突破できる可能性があることだろう。半導体技術は微細化による性能向上とコストダウンを同時達成し、半世紀以上にわたってコンピュータの演算能力はムーアの法則に従って指数関数的に向上し私たちの豊かな暮らしを支える基盤となってきた。しかし、このようなフリーランチの性能向上は限界に差し掛かっており性能向上の伸びは減速してきている。一方、人工知能・ビッグデータは大きなトレンドとなりコンピュータの応用範囲は拡大、向けられる計算要求も高まるばかりである^[34, 35]。このままにも対策がされず利用だけが増えていけば、早晩、世界の電力消費量の大半をITシステムが占めることにもなりかねない^[36]とまで言われている（ただし、経済合理性に反してデータセンターの電力消費量が一方的に増加することは考えにくい¹⁾）。

1 市場規模で見ると電力市場の3兆ドルに対しデータセンターの市場規模は500億ドル弱であり、電力コストが半分だとしてもデータセンターが今の100倍以上の市場価値を出さなければ世界の電力の半分を占めることはできない^[37]

表 2-1 物理学と情報学・計算機科学

年	熱力学・統計力学	量子力学・量子情報	情報学・計算機科学
19C	1824 カルノーサイクル 1865 熱力学第1・2法則 1867 マクスウェルのデーモン 1871 ボルツマンの公式	1859 黒体問題	1837 解析機関
1900s	1902 統計力学の確立 1905 ブラウン運動	1900 プランクの量子仮説 1905 光量子仮説	
1910s		1911 原子核の発見 1913 ボーア模型	
1920s	1926 熱雑音	1923 ド・ブロイ波 1926 シュレーディンガー方程式 1927 不確定性関係	
1930s	1931 オンサーガーの相反定理	1932 量子力学の数学的基礎 1935 EPR パラドクス	1936 チューリングマシン 1938 デジタル回路・論理回路
1940s	1946 モンテカルロ法	1948 トランジスタ	1945 フォン・ノイマンアーキテクチャー 1946 ENIAC 1948 シャノンの情報理論
1950s	1951 チューリングパターン 1951 揺動散逸定理 1955 散逸構造 1957 最大エントロピー原理		
1960s	1961 ローレンツ方程式	1960 レーザー 1960 半導体中のトンネル効果 1961 二重スリット実験 1964 ベルの不等式	1961 ランダウア原理 1965 ムーアの法則 1969 ARPANET
1970s	1975 カオス	1978 イオントラップ	1974 デナード則 1976 公開鍵暗号
1980s	1981 確率共鳴 1982 ホップフィールドネットワーク	1982 量子もつれの実験検証 1984 量子暗号鍵配送 1985 量子コンピュータの原理 1985 冷却中性原子	1982 情報幾何 1989 WWW
1990s	1993 ゆらぎの定理 1997 ジャルジンスキー等式 1998 クルックスのゆらぎの定理	1993 量子テレポーテーション 1994 素因数分解アルゴリズム 1995 人工量子系でのBEC 1999 超伝導量子ビット	1995 Windows 95
2000s	2005 ゆらぎの定理の検証 2008 情報熱力学	2003 小澤の不等式	
2010s	2010 マクスウェルのデーモン実験	2017 量子通信衛星「墨子号」 2019 量子超越の実験検証	2012 AlexNet

2 研究開発を実施する意義

1980年代から1990年代にかけてデナード・スケーリング（リソグラフィの進歩とよりクリーンなプロセスによりトランジスタのサイズが小さくなると、それらを使って設計された回路の速度が向上する）が半導体のロードマップを支配していた。1965年初頭には、Intelの共同創設者であるムーアが、半導体産業の経済は1ドルあたりのトランジスタ数が12か月ごとに2倍になるという関係に従っているという見解を発表していたが（1975年に、24か月ごとに修正）、この頃には逸脱が見られるようになっていた。1990年代半ばに回路が小型化されると、配線遅延がトランジスタの速度を支配し始めた。複数の命令を並行して実行することで配線遅延を「隠し」、コンピュータの性能向上が18か月ごとに2倍になるという期待には応え続けることができた。以来、ムーアの法則、デナード・スケーリング、およびマイクロアーキテクチャの進歩の組み合わせも、全てまとめて「ムーアの法則」と呼ばれるようになってしまった。

2005年、トランジスタ回路の電力密度が非常に大きくなりデナード・スケーリングが終わりを迎えると、今度はマイクロプロセッサの冷却がシステムのコストとパフォーマンスを支配し始めた。電力消費によって発生する熱をシステムの冷却能力よりも抑えることができなければマイクロプロセッサを正常動作させることさえできないため、性能向上よりも消費電力抑制が優先されるようになった。これは「消費電力の壁（power wall）」と呼ばれる。

しかしトランジスタ数はムーアの法則通りに増え続けたため、追加のトランジスタを一つのLSIチップに複数の処理要素（コア）を配置するために使えるようになった。この新しいマイクロプロセッサを期待通り機能させるには、並列プログラムが必要であった。2000年代後半から2010年代にかけてのマルチコアアプローチの性能向上はアムダールの法則（並列処理の利用は計算の並列化できない部分によって制限される）に従い、ムーアの法則に従う性能向上には追いつけなかった。このマイクロプロセッサの性能向上の鈍化に関するニュースはコンピューティングコミュニティの隅々にまで広まり、IEEEではデバイスからアルゴリズムまでコンピューティング全体を再考するためのRebooting Computing Initiativeが立ち上がった^[38]。

危機感と期待感の入り混じる中、「ドメイン指向アーキテクチャ」の考え方が注目されている^[34, 39, 40]。代表例はGPU(Graphic Processing Unit)やAIアクセラレータである。GPUはもともと画像処理用のプロセッサだったが、その並列性を活かして大量の積和演算を含む多層のニューラルネットワークの計算をCPUより効率よく行えるとわかり、近年では機械学習むけのGPUや専用チップも登場した。組合せ最適化問題をイジングモデルにマップして解くことに特化したイジングマシンと呼ばれるタイプのコンピュータも登場した。このようにアーキテクチャが現在ことさら脚光を浴びているのは、ムーアの法則に頼らずに、なるべく長期にわたって安価に性能向上する方法論が必要となったためである。

コンピュータサイエンスの文脈では、量子コンピュータは半導体微細加工のみに頼る性能向上の行き詰まりと急速に増加・多様化する計算ニーズとの間で、低エネルギーでも飛躍的に計算性能を向上させうる一手段と認識されている^[35, 41]。もちろん、量子コンピュータのハードウェアの多くも半導体の微細加工技術に依存しており、量子コンピュータの性能向上は壊れやすい量子状態を高精度に制御・測定する（古典の）エレクトロニクスに支えられているため、ムーアの法則から完全に逃れることはできない。また、演算性能の指数関数的な向上には量子コンピュータの規模を大きくする必要があり、その技術的難易度や経済的なコストが指数関数的に上昇するようでは元も子もない。したがって、量子コンピュータはムーア法則の終焉という問題を完全に解決することはできないが、社会が求める方向性として低消費電力で非常に効率よく計算を実行しうる1つの重要な可能性であるのは間違いない。その熱力学的な性質もまだ明らかでなく、量子コンピュータの研究開発の途中でコンピュータの発展や科学的発見に貢献できるものがたくさん生み出されると期待される。

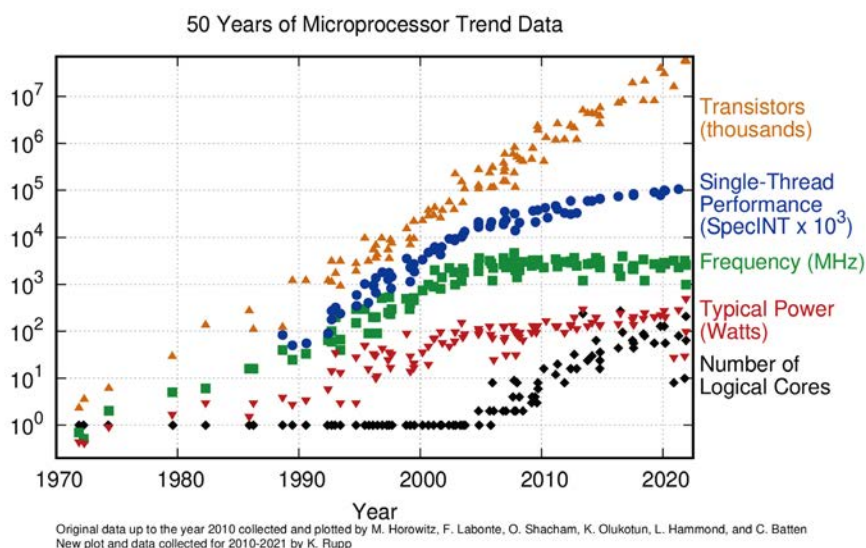


図 2-2 50年間のプロセッサのトレンド [42]

(5) 数理学の重要性

これまで数学と科学技術の様々な分野とは深い関係を持って発展してきた。たとえば、偏微分方程式、幾何学、群論、フーリエ解析、確率論、統計、最適化、数理モデル、アルゴリズム、数値解析など科学技術の基盤となる概念や論理構造など、数学は科学技術を記述する言語としてその進展に多大なる貢献をしてきた(表 2-2)。一方で、数学もまた科学技術のさまざまな分野からの刺激を受けることで新たな問題を見いだしたり、近年ではコンピュータを用いた証明が行われるなど、相互に支え合う関係を築いてきた。

数学の成果の汎用性は高く、数学あるいは自然界の現象や法則の理解だけでなく、環境、エネルギー、食料、水問題など学際的研究や社会的問題解決にも直接役立ち、社会の発展に大きく貢献してきた [43, 44]。また、IT機器の普及や、AI、ビッグデータ、IoTなどの社会実装による社会のあらゆる面でのデジタル化が進む中で、数学は先へと進むためにどうしても欠かすことのできない科学とも言われている [45]。「数理資本主義の時代～数学パワーが世界を変える～」報告書 [45] で挙げられた数学に対する期待には

- ・ Society5.0 の実現には高い理数能力でAI・データを使いこなす力に加え、課題設定・解決力や異なるものを組み合わせる力など、価値創造を行う人材が求められている。
- ・ 第四次産業革命においては、具体的な課題を抽象化・一般化することによって俯瞰し、統合的に解決する能力が以前にもまして強く求められるが、その抽象化・一般化の能力は、まさに数学によって実現されるものである。
- ・ 数学は、ライフサイエンス、ナノテクノロジー、環境科学、材料科学、物理学、化学、金融工学、経済学、社会学など様々な分野の共通基盤であり、分野横断的・分野融合的な研究開発を可能にする。

などがある(同報告書から一部要約)。

20 世紀後半においても数学のアイデアがもととなったブレークスルーが多数知られている。例えば、確率解析、暗号、圧縮センシング、スパースモデリングなどの発展には最先端の数学が本質的な役割を果たしてきた。物理学と情報学・計算機科学をつなぐ上でその基盤となる共通言語として数学・数理学が重要であるだけでなく、物理学と情報学・計算機科学の融合領域は新たな問題の提示など数学・数理学の研究への大きな刺激となると期待される。数学上の未解決問題として有名なミレニアム懸賞問題(表 2-3)のうち「ヤン-ミルズ方程式と質量ギャップ問題」「ナビエ-ストークス方程式の解の存在と滑らかさ」は物理学上の未解

決問題、「 $P \neq NP$ 予想」は計算機科学上の未解決問題でもある。リーマン予想のように物理学の問題との関連が指摘されているものもあり、物理学や情報学・計算機科学の視点やツールが、数学上の未解決問題を解決に導く新しいアプローチを提供することも考えられる。

表 2-2 数学・数理科学の発展と物理学・情報学への応用の歴史

数学・数理科学上の新発見	数学・数理科学の発展	物理学・情報学・計算機科学への応用
素数の発見	フェルマーの小定理、有限体、楕円曲線	暗号、通信の信頼性・安全性
方程式の解法	群、ガロア理論、対称性の記述	量子力学、物性物理学
ピタゴラスの定理	ユークリッド幾何学、リーマン幾何学	相対性理論、宇宙論
天体や物の運動	微分、積分	力学、微分方程式 (自然現象を記述する基本用語)
賭けの数理	確率論、確率解析、伊藤の公式	ブラウン運動、熱・統計力学

表 2-3 ミレニアム懸賞問題と物理学・情報学

ミレニアム懸賞問題	具体的内容	物理学・情報学との関係
ヤン-ミルズ方程式と質量ギャップ問題	任意のコンパクトな単純ゲージ群 G に対して、非自明な量子ヤン-ミルズ理論が \mathbb{R}^4 上に存在し、質量ギャップ $\Delta > 0$ を持つことを証明せよ。	量子色力学の未解決問題。素粒子物理学の標準模型の基礎にある非可換な場の量子論（ヤン-ミルズ理論）によって予言される最小質量を持つ粒子の質量が Δ である。
リーマン予想	リーマンゼータ関数 $\zeta(s)$ の非自明な零点 s は全て、実部が $1/2$ の直線上に存在する。	ヒュー・モンゴメリーによりゼータ関数上の零点の分布の数式が原子核のエネルギー間隔を表す式と一致するという予想（モンゴメリー・オドリズコ予想）が示されている（1973）
$P \neq NP$ 予想	計算複雑性理論におけるクラス P とクラス NP が等しくない。	理論計算機科学の未解決問題。多くの研究者が多項式時間のアルゴリズム開発に取り組んでいるにもかかわらず、効率的なアルゴリズムは未発見である。
ナビエ-ストークス方程式の解の存在と滑らかさ	3次元空間と（1次元の）時間の中で、初期速度を与えると、ナビエ-ストークス方程式の解となる速度ベクトル場と圧力のスカラー場が存在して、双方とも滑らかで大域的に定義されるか。	ナビエ-ストークス方程式は、非圧縮気体や液体を扱う流体力学の基礎方程式だが、数学的にはその解の基本的性質さえ証明されていないことが多い。乱流の理解など工学的にも重要な問題である。
ホッジ予想	複素解析多様体のあるホモロジー類は、代数的なド・ラームコホモロジー類であろう、つまり、部分多様体のホモロジー類のポアンカレ双対の和として表されるようなド・ラームコホモロジー類であろう。	物性物理学ではトポロジーの概念が古くから用いられている。とくに物質の相を自発的対称性の破れと群論によって特徴づけ、秩序パラメータ空間の構造をホモトピー群により分類する方法により磁性体、液晶、超伝導体など様々な物質に統一的な視点を与える。運動量空間のトポロジーを反映したトポロジカル状態の研究も進んでいる。
ポアンカレ予想（解決済）	単連結な3次元閉多様体は3次元球面 S^3 に同相である。	ペレルマンの証明には熱量・エントロピーなどの物理学上の用語が使われているほか、リッチフロー方程式が用いられている。これは非線形拡散方程式の一種で、ペレルマンは熱方程式（勾配流）の視点からリッチフロー方程式を捉え、そこでエントロピーを定義して証明に用いた。熱方程式の視点は最適輸送とも密接に関係している。
バーチ・スウィンナー・トン=ダイアー予想	楕円曲線 E 上の有理点と無限遠点 O のなす有限生成アーベル群 G のランクが、 E の L 関数 $L(E, s)$ の $s = 1$ における零点の位数と一致する。これはすなわち、有理点の個数が有限（ランク = 0）かどうか測ることについての可能性を示唆する。	楕円曲線暗号は有理点のなす有限生成アーベル群 G における離散対数問題の困難さによる暗号である。BSD 予想が解かれ、有理点の個数が有限であるかどうか判断できるならば、 G における離散対数問題が一部危殆化する可能性がある。

(6) 国内外の研究コミュニティの動向

関連する学会、ワークショップ、プロジェクトなど研究コミュニティの動向を表2-4にまとめた。総じて、物理学と情報学・計算機科学のコミュニティの関係はまだ希薄であり、一時的に開催される国際ワークショップなどでかろうじてつながっている程度である。物理学の中も一枚岩ではなく、統計物理のコミュニティと量子情報のコミュニティのつながりは弱い。とくに、統計物理における「ゆらぎの熱力学」と、量子情報における「リソース理論」のコミュニティは世界的に見ても関係が希薄である。一方、日本においては、統計物理のコミュニティの層が厚く、相対的に量子情報が薄いということもあり、これらの分野の相互交流が比較的行われている。計算機科学と熱・統計力学のコミュニティを繋げる試みは米国 IEEE Rebooting Computing Initiative で進められている^[46]が、わが国でも今すぐ取り組みを加速すればこの分野を世界的にリードすることも可能である。日本における研究コミュニティの特性を活かした推進方策の実施が、この新しい領域の推進の鍵となるだろう。

統計物理については米国物理学会では「Topical Group on Statistical & Non-linear Physics」^[47]で扱われる。統計物理分野最大の国際会議は「International Conference on Statistical Physics (Statphys)」^[48]であり、3年に1度開催される。規模は1~2千人と大きく、サテライト会議も多数開催される。Statphysの中でゆらぎの熱力学は主要分野のひとつとして扱われている(表2-5)。ゆらぎの熱力学については2020年より毎年開催されている国際ワークショップ「The Workshop on Stochastic Thermodynamics (WOST)」^[49]でも集中的に議論されている。参加登録者の規模は数百名である。Statphysのトピックス(表2-5)にも見られるように、統計物理学と生物物理学のコミュニティとのつながりは強い。ゆらぎの熱力学の立場からの情報熱力学に関連した国内の大型科研費プロジェクト新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」でも主要なターゲットは分子・細胞など様々な階層における生命現象である^[50]。機械学習と物理学の融合についてはニューラルネットワークの国際会議である NeurIPS でワークショップが開催されている^[51]ほか、流体力学と関連が深い最適輸送理論の機械学習への応用についてもワークショップが開催されている^[52]。研究プロジェクトとしては、国内では学術変革領域研究(A)「学習物理学の創成－機械学習と物理学の融合新領域による基礎物理学の変革」^[53]が立ち上がり、精力的な研究開発が進められている。

量子情報については米国物理学会では「Division of Quantum Information」^[54]で扱われる。この5年ほどでメンバー数が倍増するなどコミュニティが急速に拡大しており、APSでは元々Topical Group(分科会)であった「Topical Group of Quantum Information」が2018年から格上げされた(表2-6)。量子情報処理に関する国際会議は「Conference on Quantum Information Processing (QIP)」^[55]などがあり、情報学・計算機科学分野との融合領域となっている。取り扱われるトピックスは量子計算、量子シミュレーション、量子アルゴリズムと計算複雑性、量子情報理論、量子暗号、量子通信、量子計測・センシング、量子技術(光学、NMR、固体など)と多岐にわたる。近年では、量子コンピュータのアーキテクチャや量子プロセッサの設計、制御用のCryo-CMOSまで含めた実装に関することや、量子プログラミング言語など計算機科学の文脈で重要となるトピックスについては「IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)」^[57]で扱われる。国内では電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ「量子情報技術研究会(QIT)」^[58]が中心的である。量子情報の考え方やツールを重力理論・超弦理論といった基礎物理に応用する考え方のプロジェクトとしては、Simons Foundationの「It from Qubit」^[5]がある。国内でもこれに対応するようなプロジェクトとして学術変革領域研究(A)「極限宇宙の物理法則を創る－量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」^[56]が始まっている。量子情報と量子物性を融合する試みはJST さきがけ「物質と情報の量子協奏」^[60]領域でも進められている。

表2-4 関連する学会・ワークショップ・プロジェクト

	物理学	情報学・計算機科学
統計力学アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> ・(学会) The American Physical Society “Topical Group on Statistical & Nonlinear Physics” [47] ・(国際会議) “International Conference on Statistical Physics (Statphys)” [48] ・(ワークショップ) “Workshop on Stochastic Thermodynamics” [49] ・(プロジェクト) 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」[50] ・(プロジェクト) 学術変革領域研究 (A)「学習物理学の創成－機械学習と物理学の融合新領域による基礎物理学の変革」[53] 	<ul style="list-style-type: none"> ・(ワークショップ) NeurIPS 2021 Workshop “Optimal Transport and Machine Learning” [52] ・(ワークショップ) NeurIPS 2022 Workshop “Machine learning and the Physical Sciences” [51] ・CCC Workshop “Thermodynamic Computing” [46]
量子情報アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> ・(学会) The American Physical Society “Division of Quantum Information” [54] ・(国際会議) Conference on Quantum Information Processing (QIP) [55] ・(プロジェクト) Simons Collaboration on Quantum Fields, Gravity and Information “It from Qubit” [5] ・(プロジェクト) 学術変革領域研究 (A)「極限宇宙の物理法則を創る－量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」[56] 	<ul style="list-style-type: none"> ・(学会) IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) [57] ・(研究会) 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ「量子情報技術研究会 (QIT)」[58] ・(研究会) 情報処理学会「量子ソフトウェア研究会 (QIT)」[59]

表2-5 Statphys で扱われるトピックス [48]

	トピック	内容
1	一般のおよび数学的側面	厳密な結果、正確な解、確率論と確率過程、平衡状態における相転移と臨界現象、場の理論など
2	非平衡統計物理学	ゆらぎの熱力学、情報の熱力学、輸送理論、異常拡散、大偏差、非平衡相転移など
3	量子多体系と量子流体	強相関電子、冷却原子、グラフェン、メゾスコピック量子現象、低次元量子場理論、量子相転移、量子情報、エンタングルメント、スピン液体、多体局在化、孤立量子系の熱化など
4	無秩序系・ガラス系	ガラスとガラス転移、粒状物質とジャミング転移、スピンガラスとその他のランダムシステム、アンダーソン/多体局在、ニューラルネットワークなど
5	生物物理学	分子モーター、細胞骨格、単細胞および多細胞ダイナミクス、バクテリア、スイマー、生体膜、生体高分子の折り畳み、ゲノミクス、生体ネットワーク、進化モデル、進化ゲーム理論、生態および環境モデルなど
6	ソフトマター	ソフトマター、アクティブマター、分子・イオン流体、湿潤、自己組織化、液晶、コロイドなど
7	非線形物理学	力学系、カオス (古典と量子)、パターン形成、化学反応、単純流体、非線形波動、流体力学的不安定性、乱流 (古典、量子、能動)、振動子、同期、時空間組織など
8	学際的システム・複雑系	複雑ネットワーク、経済物理学、社会物理学、社会技術システム、人間の移動、都市問題、生態系、流行モデル、疫学、機械学習と統計学習、人工知能、ニューラルネットワークと情報処理、非従来型コンピューティングなど

表 2-6 米国物理学会の部門メンバーの増加率^[61]

部門名 (略称)	FY2015 [人]	FY2022 [人]	増加率
原子・分子・光学 (DAMOP)	3,045	3,327	9%
宇宙物理 (DAP)	2,899	2,899	0%
生物物理 (DBIO)	2,034	2,188	8%
化学物理 (DCMP)	1,682	1,317	-22%
計算物理 (DCOMP)	2,686	2,928	9%
凝縮系物理 (DCP)	5,839	6,731	15%
流体力学 (DFD)	2,910	3,250	12%
重力 (DGRAV)	1,584	1,651	4%
レーザー科学 (DLS)	1,356	1,204	-11%
材料物理 (DMP)	2,934	2,979	2%
原子核物理 (DNP)	2,707	2,812	4%
ビーム物理 (DPB)	1,052	1,070	2%
素粒子物理 (DPF)	3,447	3,448	0%
プラズマ物理 (DPP)	2,437	2,652	9%
ポリマー物理 (DPOLY)	1,417	1,351	-5%
量子情報 (DQI)	1,360	3,321	144%
ソフトマター (DSOFT)	668	2,127	218%

(7) 問題点

情報学や計算機科学と物理学との関係の深化の中で、物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用するというこれまでの方向に加えて、その逆向きとなる情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する流れが活発化している。現代物理学においては非平衡系の測定や制御にはしばしば「情報」の概念が重要となる。基礎物理における重要な問題への情報熱力学や量子情報科学の貢献も顕在化してきている。熱ゆらぎのエネルギースケールでのフィードバック制御を行える実験系やイオンや冷却中性原子を用いた制御可能な量子多体系など、物理学における情報の役割は実験的にも深く理解されつつある。今後は情報処理にかかるエネルギー効率の向上や新たな計算原理の提案、その実現デバイスの設計など工学への展開も期待されている。

一方、現在私たちが享受している豊かなくらしの基盤となっているコンピューティングパラダイムは根本的な限界に直面している。ハードウェア面ではデバイスサイズがナノメートルスケールまで小さくなり熱力学的ゆらぎの影響を排除するのに苦労している。ソフトウェアに関しては、経済システム、生態系システム、医療、社会システムなど様々な応用領域で計算の効率化に機械学習の有用性が認識されているが、学習モデルの訓練にかかるエネルギーコストの問題は残っている。とくに現在の機械学習システムは、決定的に振る舞うハードウェアの上でかなりの計算コストとエネルギーコストをかけてソフトウェア的に確率を生成している。

計算機システムの電力消費は伸び続けており、地球環境の面からも経済的にも持続可能とは言い難い状況である。経済面では半導体チップの製造プラントの建設コストや地政学上リスクの上昇も問題である。このようにデバイスのスケーリング、ソフトウェアの複雑さ、適応性、エネルギー消費、製造の経済性など、現在のコンピューティングパラダイムはあらゆる面で成熟しており、このまま継続的に改善を続けることは難しい状況である。科学技術的な進歩が今後も継続し、それによる社会的・経済的利益を引き続き私たちが享受するためには、コンピュータの計算能力の大幅な向上と同時に、低消費電力化と低コスト化を同時達成する必要がある。

コンピューティングを進歩させるため、量子力学や熱力学など物理的な根拠のある計算パラダイムへの移行が必要である。物理学の視点で見ると、情報処理はエネルギーを消費して有限の時間でコンピュータ（あるいはその要素となる素子）の状態変化を起こすことであり、熱力学に注意を払うのは当然である。Green500におけるトップマシンの計算効率はおよそ 10 GFLOPS/W^[62] 程度であるが、これはランダウア限界での効率 10 PFLOPS/W² と 100 万倍の開きがある。これは実際のコンピュータがランダウア原理が仮定しているような準静的には振る舞っておらず、有限の時間での処理を行っているからに他ならない。実際に理論限界からの程度、何が理由で乖離しているのかを解析するためにも、まずは従来の平衡熱力学が与えるランダウア限界の議論を非平衡熱力学の領域まで拡大することが不可欠である。その基礎は情報量と熱力学量を等価に扱える枠組みである情報熱力学だと期待されている。情報熱力学は量子系についても議論することができ、量子コンピュータの熱力学も未解明の点が多く挑戦的な課題だろう。大規模な量子コンピュータの実現は、量子情報と情報熱力学の融合が真に求められる長期的な課題といえる。

ムーアの法則によるコンピュータハードウェア性能の指数関数的な向上により、ソフトウェアが受けた最も大きな恩恵は抽象化である^[63]。熱力学の観点からコンピュータを再考するには抽象化レイヤ（図2-3）のそれぞれの段階で、それらが実装されている物理システムに何を想定しているか/していないかを検討することが有益だろう。コンピュータにおける抽象化レイヤはソフトウェアの移植性を向上させ、それぞれのレイヤでの最適化の機会も増加させる。プロセッサ、メモリ、ストレージなどあらゆるハードウェアリソースは冗長になってしまうが、これらはムーアの法則により低コストで手に入るため、自動最適化やプログラムの時間の節約というメリットが冗長なことによる非効率性を遥かに上回ってきた。計算機システム内のコンポーネントを粗視化、階層化、分離するこの戦略は、コンポーネントを理解し、エンジニアリングし、プログラミングする必要性によって推進され、現代のコンピューティングパラダイムの有効な基盤となっている。しかし、この抽象化のせいでコンピュータは論理演算を実装する理想的なステートマシンと見なされ、ほとんどのレイヤでは基礎となる熱力学は無視されている。

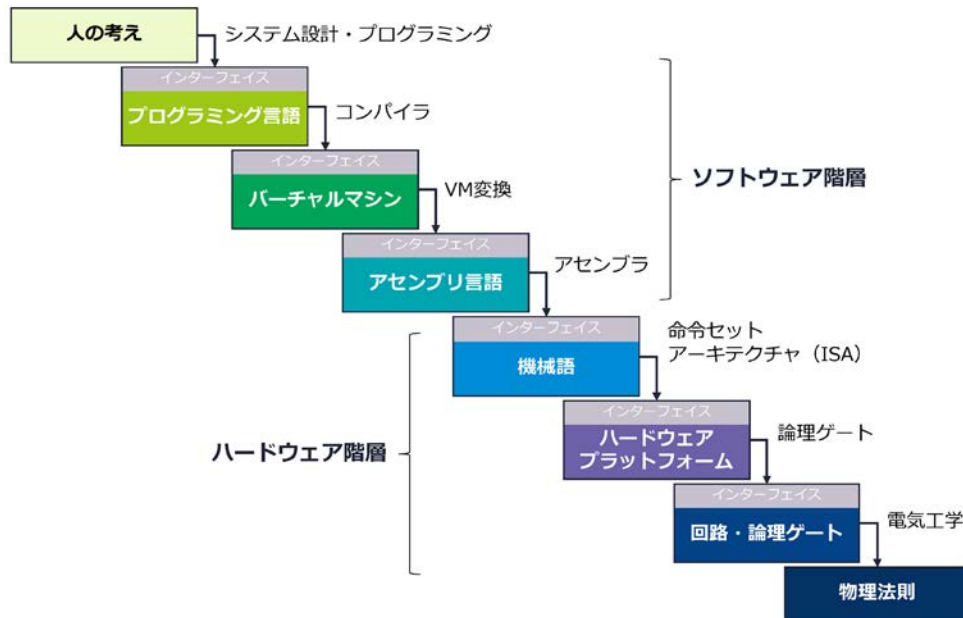


図2-3 コンピュータの抽象化レイヤー構造^[63]

2 大雑把に $1 \text{ FLOP} \sim 10^4 \text{ bitOP}$ だとすると、ランダウア原理から1ビットの情報処理に必要なエネルギーは $k_B \log 2 \sim 2.85 \times 10^{-21} \text{ J}$ なので、 $W=j/s$ よりランダウア限界での計算効率は 10 PFLOPS/W 相当と見積もれる。

情報熱力学の言葉でコンピューティングパラダイムを再構築することは、物理世界のすべてのプロセスが自由エネルギーの散逸によって駆動されるという認識から始まるだろう。有限の時間での状態の遷移（＝情報処理）は非平衡な物理プロセスだが、現在のパラダイムでは一種の数理的な状態遷移プロセスと見なされてしまっている。そのため、熱力学がもたらす速度限界や有限時間で状態を変化させることに伴う熱力学的コストとのトレードオフは、論理のレベルにはほとんど反映されていない。量子コンピュータの場合には、エネルギー散逸に加えて状態遷移が本質的に確率的であることも考慮する必要がある。このように現在の情報学・計算機科学では、熱力学はエネルギー効率の高いハードウェア設計や効果的な熱除去を動機付ける工学的な制約と見なされているが、本来はソフトウェア階層や計算原理にも熱力学的な考察が必要である。現在のコンピューティング技術は熱力学的効率の限界にはほど遠いと理解されているが、どのようにしてこの限界に近づけるのかという工学的な指導原理はまだ不明である。

低エネルギーの情報処理システムの実現には生命システムからのインスピレーションも極めて重要だろう。動物、植物、バクテリアなど、複雑な資源制約下で繁栄できるのはエネルギー効率の高い構成や状態変化を自発的に見つけた種である。自然計算としてはタンパク質の折り畳みも参考になろう。これらのシステムのほとんどは非平衡系であり「情報」の概念でそのダイナミクスを理解し直すことで、その計算能力を将来のコンピューティングシステムに利用できる形に翻訳できるものと期待される。

包括的な科学的課題は、量子系まで含めた非平衡系における散逸、ゆらぎ、平衡化、測定、制御などを「情報」の観点から理解し、新しいコンピューティングパラダイムへとつなげていくことである。そのためには現在までに構築されてきた物理学と情報学・計算機科学との交流を、より一層洗練させ、深化させていく必要がある。そのために最も深刻な課題となるのは、研究コミュニティ間の交流が限定的であることだろう。多くの研究開発課題は情報学・計算機科学と物理学の間や、量子情報と統計力学の間など、分野やコミュニティを跨った取り組みが不可欠である。そのため、問題意識の共有や議論が行える場が必要である。異分野連携・分野融合に関連する推進上の課題の詳細は4章で述べる。

2.2 社会・経済的効果

Society 5.0 や Beyond 5G/6G に向けた動きが続いており、今後もそのスピードはますます加速していくと見込まれている。直近のIPトラフィックは2年で2倍^[64]、深層学習にかかる計算コストは3.4ヶ月で2倍^[65]といったペースで増加している一方で、CPUのエネルギー効率の改善率は近年2.6年で2倍^[66]と鈍化してきており、高速・大容量・低遅延通信や大規模・低消費電力の計算を支える技術の発展が望まれている。2030年に消費電力の20%以上がIT関連になるとの予測^[36]もあり、情報処理にかかるエネルギー効率の抜本的改善が必要である。その解決手段の一つとして、非平衡ダイナミクスの理解とその計算機科学への応用に注目が高まっている。

非平衡系は、自然界の様々なところに存在しており、基礎物理学や生物学等など幅広い学術分野で研究がなされている。物理学の概念や手法で情報・計算を扱う方向と、情報理論の数理から物理法則を理解するという両方向の交流が活発化している。量子から生物まで非平衡ダイナミクスの活用場が多数見いだされ、今後も発展が見込まれる。本プロポーザルの社会・経済的効果は安全・安心な機械学習モデル、量子計算・量子通信技術、革新的な情報熱機関・新デバイスなど、ソフトウェアからハードウェアまで広範囲に及び、さまざまな形で産業応用や社会課題解決に結びつくこと期待される。情報熱機関は新しいセンシング・イメージング技術にもつながり、細胞内の情報伝達やタンパク質の相互作用の情報熱力学的な理解を通して革新的な創薬や治療などにも貢献しうる。情報と熱の問題はここに挙げられていない様々な産業ドメインにも潜んでおり、まだ誰も知らない産業応用や新サービスが創出されると期待される。

安全・安心な機械学習モデルの実用化

音声認識技術を用いた自動会話プログラムであるチャットボットや画像認識による翻訳サービスなど、機械学習モデルが実用化され、日常生活に普及してきている。機械学習モデルは大量のデータを用いてモデルを最適化（学習）することで機能するが、最適化が行われる原理や仕組みの解明は不十分である。統計力学によるアプローチから深層学習の仕組みを解明しようとする取り組みや非平衡系の研究から得られた知見を生成モデルへ応用する研究が行われているものの、どの程度の訓練データを用いればどの程度の精度の機能が得られるかが事前に分からず学習効率の評価は依然として難しい^[16,67]。

今後も機械学習モデルを利用したサービスは普及することが見込まれており、より日常生活に密着したものとなるためには人々が安全・安心だと理解できることが必要である。そのためには、動作原理や仕組みを解明し、同モデルの限界やシステム制御方法を理解した上で信頼のおけるシステムを開発しなければならない。非平衡系の研究を通じて機械学習モデルの動作原理を解明することで、学習効率の改善だけでなく安全・安心なシステムを開発し、社会に提供できるようになると期待される。

量子計算・量子通信技術の実用化・普及・高度化

大規模な量子コンピュータや量子ネットワークの実現には、量子多体系の非平衡ダイナミクスの制御が必要不可欠である。量子暗号や量子通信は、従来の手法とは抜本的に異なる原理により安全な通信手段への応用が期待されている。期待は高いものの、難しさの根源となっている壊れやすい量子系を精密に制御する技術を確立する必要がある。量子系を制御する場合、基本素子である量子ビットに生じるノイズを訂正（誤り訂正）しなければならない。量子誤り訂正は量子コンピュータを開発する際の技術課題の一つというだけでなく、根本原理の解明から行わなければならない非常に難しい課題であることが分かっている。非平衡ダイナミクスの理解を進めることで、量子計算・量子通信の実用化に大きな貢献をすることが期待できる。

革新的な情報熱機関・新デバイスの実用化

熱ゆらぎのエネルギースケールでの測定やフィードバック制御は、新しい原理・現象に基づく革新的情報熱デバイスの創出につながると期待される。環境中に存在する温度差や熱雑音を効率よく電力に変換するエネルギーハーベスティング技術への応用は、IoT（Internet of Things）の実現に欠かせない重要技術とされている。新たなセンシングデバイスは、これまでは測定が難しかった物理量や、オペランド計測などの最先端計測技術への発展も期待できる^[68]。例えば、生きたまま細胞を動的に観測することができるようになれば、細胞内のタンパク質の動的な振る舞いやDNA複製過程の精密測定は創薬への応用が可能となる。

情報処理エネルギー効率の改善

現在のコンピュータや情報通信技術では発熱量が大きく、消費電力が無駄になっている。1ビットの情報処理に必要なエネルギー消費量を理論的に示したランダウア限界と最新のトップマシンの同消費量との差が100万倍も開いている。ランダウア原理が仮定する状況は実際のコンピュータにおける情報処理プロセスからは乖離しており、既存の（平衡）熱力学の延長ではこの理論限界に近づくことはできない。情報熱力学に基づく新たな計算原理の創出やその実装デバイスが実現すれば、ハードウェア・ソフトウェアに渡るブレークスルーとなると期待される。とくに期待されるのは、情報処理のエネルギー効率改善と計算コストの効率化（新たな計算原理やアルゴリズム）である。

2.3 科学技術上の効果

本プロポーザルで提言する研究課題・推進方策を実行することで、物理の概念や手法で情報・計算を扱う研究者と、情報理論の数理から物理法則を理解しようとする研究者の双方向の交流がますます活性化し、既存学問分野の垣根を超えた「情報・物理・数理の革新的融合領域」と言える新たな学際領域が形成される。物理学を中心に量子から生物まで非平衡系のダイナミクスにおける新しい理論的枠組みや実験的検証手法が多数見いだされ、計算機科学ではコンピューティングパラダイムの革新も期待される。

これまでの物理学では閉じられた平衡系を扱う理論的枠組みしか存在せず、そこから大きく外れる非平衡系は議論することが困難であった^[18]。例えば、非平衡系は、平衡系からの外れを1次の微小量とみなしてよい線形非平衡系と、この近似が許されない非線形非平衡系に大別されるが、これまでの物理学では主に線形非平衡系を扱う理論的枠組み（線形応答理論など）しか構築されていなかった。しかし、コンピュータをはじめ世の中に存在するデバイスは（ほぼ）全てが非平衡系であることから、本プロポーザルの提言内容を実行することで、既存の線形応答を超える非線形の強い領域まで扱える理論的枠組みが構築されることが期待される。

また、その過程で新概念の発見や新現象の理論的予測・実験的検証が相次ぐことが期待される。情報量を熱力学量と対等に扱う「情報熱力学」もさらなる発展を遂げ、情報処理に必要なエネルギーの原理的限界値や新たな省エネルギーデバイスの設計指針を予言できるようになる。デバイスのスケールリング、ソフトウェアの複雑性、適応性、エネルギー消費、製造の経済性などのあらゆる面で限界に達しつつあるコンピュータのさらなる性能向上を目指し、情報熱力学を中心とした物理的に根拠のある計算原理が明らかになっていくと期待される。その影響は物理学だけでなく情報学・計算機科学でのパラダイムシフトをも可能にし、SDGsやカーボンニュートラルの実現に貢献すると期待される。平衡熱力学が与えるランダウア限界を非平衡熱力学の領域まで拡大することで、現実の計算機のエネルギーコストの最小値を正確に見積もることも可能になるだろう。さらに最小エネルギーコストで動作する新計算原理や新デバイス・アーキテクチャの設計・創製も可能だと考えられる。

低エネルギーの情報処理システムの観点からは、最もエネルギー効率が高いと言われている生命システムとの繋がりも重要となり、生物物理学やシステム生物学との連携・融合も期待される^[69, 70]。ここでは、情報熱力学の理論的枠組みを活用することで生命現象の理解を深め、生命システムの設計原理を解明することが期待される。同時に、生命現象を具体例として情報熱機関の設計原理を議論することで情報熱力学の深化や非平衡ダイナミクスを扱う理論的枠組み、実験的検証手法の開発の進展にも繋がることを期待される。

加えて、情報熱力学を量子系にも適用することで、量子コンピューティングの熱力学における未解明な課題にもアプローチ可能となり、実用性のある量子コンピューティングを実現するための新しいデバイス構造の予測・実現にも貢献することができる。

このように、本プロポーザルに記載されている研究課題や推進方法を実行することにより、古典系のみならず量子系を含めた非平衡ダイナミクスにおける散逸、ゆらぎ、平衡化（熱化）、測定、制御などを「情報」の観点から理解することが可能になり、新しいコンピューティングパラダイムを創出することができる。また、情報学・計算機科学と物理学の間や、量子情報と統計力学の間など、分野やコミュニティを跨った取り組みが活発化するだけでなく、生物物理学やシステム生物学など幅広い学問分野なども含めた多様な学問間での問題意識を共有・議論を行える場が形成され異分野連携・分野融合が加速される。

表 2-7 情報科学の考え方・ツールによる物理学の発展

(量子) 情報科学	物理学
情報エントロピー (シャノンエントロピー)	→ 熱力学第二法則の一般化
KL ダイバージェンス、フィッシャー情報量	→ ゆらぎの熱力学の定式化 (エントロピー生成)
ワッサースタイン距離、最適輸送理論	→ 熱力学的速度限界、熱力学的不確定性関係
エンタングルメント	→ テンソルネットワーク、量子多体系の表現
エンタングルメントエントロピー	→ 量子重力、ホログラフィー原理 (AdS/CFT 対応)
計算複雑性	→ トポロジカル量子相の分類
誤り訂正符号	→ アニオン、マヨラナ粒子、トポロジカル量子計算
リソース理論	→ 量子力学から熱力学の創発
量子チャネル理論、情報伝達	→ 量子多体系のダイナミクス
深層学習	→ 時空創発、量子機械学習

コラム

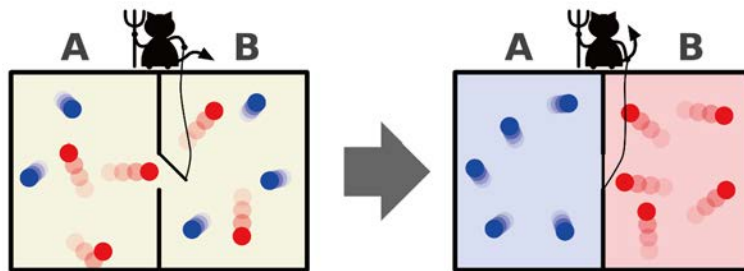
マクスウェルのデーモン

マクスウェルはボルツマンのアイデアを受け、以下のような問題を考えた。気体分子の入った箱の熱平衡状態を考える。ただし箱の真ん中に仕切りと仕切りには開閉できる扉があるとする。さらに箱の中を飛び交う個々の分子を観測し扉を開け締めするデーモンを考えた。デーモンが扉をうまく開け閉めするだけで、左右で分子の平均速度が異なる状況、すなわち非平衡状態が作れてしまうことを彼は指摘した。すると温度差があるため熱機関を使えば仕事ができ、永久機関が作れてしまうことになる。このデーモンはケルビン卿によってマクスウェルのデーモンと名付けられた。マクスウェルのデーモンはシラードのエンジンとしてより精密に定式化されたが、上の推論は一箇所を除いて正しかった。その一箇所とはデーモンの脳に蓄積された情報の取り扱いである。ランダウアの研究からデーモンの記憶を消去する過程で熱を放出することがわかった (ランダウアの原理)。この議論は後に情報熱力学によって精密化され、放出される熱量はデーモンのメモリの構造によっていることが明らかになった。

デーモンと熱力学第二法則がどのように整合するかについていろいろな議論がなされてきた。どのような物理的メカニズムで、どのようなプロセスにおいて、デーモン自身に仕事などの熱力学的コストが必要なのか、という論争が行われてきた。1961年、ランダウアの研究によって、メモリから1ビットの情報を消去するには $k_B T \log 2$ の仕事が必要だと議論されていた (ランダウア原理)。ベネットは1982年の論文で、デーモンが測定で得た情報を消去し、デーモン自身がサイクルとなる

ように初期化を行う過程で必ず仕事が必要だと、ランダウア原理に基づいて議論した。情報消去こそがデーモンと第二法則を整合させるというこの議論が、マクスウェルのデーモンのパラドックスの解決として長く受け入れられてきた。

しかし、ランダウア原理も、特定の形状のメモリのモデルに基づいたものであり、実際に、2009年になって沙川と上田により、非対称メモリを用いることで仕事なしで情報消去が可能になると指摘されている。また、沙川らはゆらぎの熱力学などに基づいて、デーモンに要する仕事についての一般的な関係式を導いた。それによると、測定に要する仕事と消去に要する仕事には一般にトレードオフがあり、両者の合計 W_{demon} の下限が相互情報量 I を用いて $W_{\text{demon}} \geq k_B T I$ で与えられる。すなわち、測定と消去を合計してはじめて仕事の普遍的下限がある。 $k_B T I$ は測定で得た相互情報量に由来しており、情報を取得する際、余分に必要な仕事はデーモンに要する仕事の起源である。このような議論によって、デーモンと熱力学第二法則の整合性が現代的に理解されると言える。ランダウア原理の議論は、シャノン情報量を環境に捨てる時に必要な仕事についてであり、相互情報量についてはない点に注意が必要だ。



3 | 具体的な研究開発課題

非平衡系の熱力学に関する理解を深め、情報処理のエネルギー効率改善や新しいコンピューティングパラダイムの創出へとつなげるにはコアとなる理論的研究が必要である。その基礎となるのは「3.1 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する」の方向性の研究だ。具体的には、「ゆらぎの定理」^[31,32]、「予測の熱力学」^[71]、「情報熱力学」^[17,18,72]などの物理学上の概念やツールを用いて、情報処理の熱力学的コストと計算速度とのトレードオフの理解が欠かせない。速度、精度、エネルギー散逸、メモリ使用量、物理的なサイズ、メモリの安定性、およびノイズの影響などの間の複雑なトレードオフが計算機の性能限界を決定しており、その理解は直ちにコンピュータアーキテクチャの設計原理として役立つと期待される。機械学習への応用も期待される。とりわけ統計力学は歴史的にもニューラルネットワークと深い関係があり、非平衡統計力学における発見はニューラルネットワークによる学習の理解や、新たな手法開発に応用できる可能性が高い。

歴史を通してそうであったように、理論物理学は次世代のコンピューティングパラダイムとその実現技術を生み出す上で中心的な役割を果たしている。「3.2 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に応用する」の方向性の研究開発により、物理学そのものを深化し発展させることは、結局は情報学や計算機科学を発展させることにつながる。今日の情報学・計算機科学は、明らかに非物理的なパラダイム（熱力学や量子力学を無視したシンボル操作とルールベースの状態変換）によって推進されているが、計算機システムの実装は依然として物理法則に従う物理的なものに依拠している。量子力学と情報理論が融合した新たな分野である量子情報科学の考え方を物理学の様々な分野に逆輸入することは極めて有用だと考えられる。例えば、リソース理論の考え方を熱力学に応用した熱力学リソース理論や、量子計算複雑性の考え方をを用いた物質のトポロジカル量子相の分類など、いくつかの分野ではすでに有効性が示されている。

このような物理学と情報学・計算機科学の交流を深める上での共通言語は数学であろう。「3.3 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する」では微分幾何、位相幾何、非可換幾何に着目する。

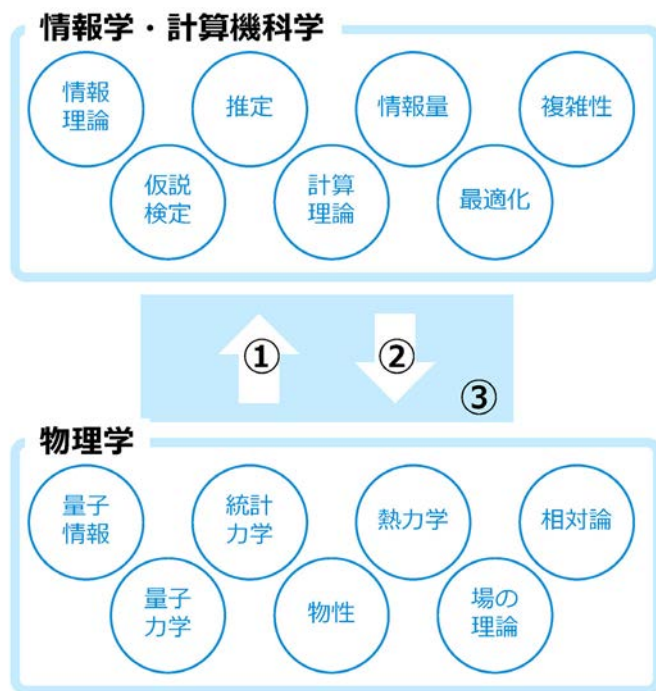


図3-1 研究開発課題の位置付け

3.1 物理学の概念・手法を情報学・計算機科学に応用する

(1) 情報熱力学による計算エネルギー効率の解明

物理学の視点から見ると、計算（情報処理）とはコンピュータ内部の何らかの状態を有限スピード（有限時間）で変化させることだと言えよう（図3-2）。コンピュータでの最も基礎的なレベルでの「状態」とは、トランジスタ内の電子がどこに分布しているかといった熱力学的な状態のことを指す。そのような熱力学的状態を有限時間で変化させると熱が発生し、エントロピーも発生する。すなわち、コンピュータの電力効率を理解し改善するには、これらの状態をなるべく少ないエネルギーで変化させるにはどうすればよいか、情報処理のエネルギー効率とスピードを支配する根本原理に立ち返る必要がある。

ランダウア原理による限界は1ビットの情報の消去にかかるエネルギーが $k_B T \log 2$ と与えられるが、これはCPU やメモリでの情報の書き込みや消去を無限に長い時間かけて行った場合（準静的）の話であり、現実のコンピュータの熱力学的な設定とは異なる。情報処理にかかるエネルギーの原理的な限界を正しく見積もる最も有力な方法は、ミクロな系の熱力学に情報理論を融合させた「情報熱力学」^[17, 72] であろう（図3-3）。情報の消去に関するランダウア限界を一般的な情報処理における散逸にまで拡張した「情報処理の第二法則」^[73, 74] の試みは、コルモゴロフ・シナイエントロピーで測定される情報生成が中心的な役割を担っている点を指摘している。これは、与えられた量の計算を進めるために供給しなければならないエネルギーの最小量を与えるもので、「情報」が熱力学的リソースであることを意味している。複雑な環境に置かれたコンピュータでは、システムがその環境の変動に同期し、予測し、適応するときには発生する熱力学的なコストや、システム構成のモジュール性に関するコスト、平衡から離れた系の間での状態間の遷移に関するコスト、ランダウ性を生成するコストなど、さまざまな熱力学的なコストを考える必要がある^[46, 75, 76]。

総じて、早く・正確に状態を変化させるには十分なエネルギー散逸（熱力学的コスト）が必要であり、様々な熱力学的トレードオフ関係の理解と、その計算機科学への応用が極めて本質的で重要な研究開発課題である。そもそも、従来の（マクロな）熱力学には「スピード」の考え方はなく、熱機関の理論的限界であるカルノー効率を有限時間の操作（つまりカルノーサイクルが仮定する準静的な過程ではない過程）で達成できるかどうかは長い間の未解決問題であった。直感的には、準静的過程以外でカルノー効率を達成するのは不可能に見えるのだが、その証明がなかったのである。ゆらぎの熱力学を用いた効率とスピード間の普遍的トレードオフ関係の証明^[77, 78] を通じ、カルノー効率と有限の仕事率（パワー）が両立しえないと分かり、ようやく熱力学にスピードの考え方がもたらされた。このような状態変化と熱力学的コストのトレードオフ関係は「速度限界（speed limit）」とも呼ばれ、近年精力的に研究が進められている。状態を大きく変化させるような場合（局所詳細釣り合いを満たさない場合）については、標準のエントロピー生成の代わりに波多野・佐々エントロピー生成を用いることで状態変換の速度とエントロピー生成の間のトレードオフ関係（不等式）を一般化できると報告されている^[79]。

計算機の熱力学的状態の変化とは計算（情報処理）そのものであり、計算速度や正確さが消費電力とトレードオフ関係にあることと直接対応している。熱力学的な状態を確率分布とみなせば、その遷移をフィッシャー計量を用いた情報幾何学や、ワッサースタイン距離を用いる最適輸送理論などの枠組みで扱うこととの親和性の高さも理解できる^[20, 21]。実際、情報幾何学と速度限界・熱力学的不確定性関係^[80] や、ワッサースタイン距離と熱力学的速度限界^[81]、2つの分布間の距離を熱力学的不可逆性の度合いを使って解釈する関係式^[82] など、情報幾何学と熱力学の密接な関係からさまざまな発見が得られている。熱力学的コストや熱ゆらぎを抑えながら熱力学に最適な状態変化を考えることで、省エネルギーな計算原理や、新しいアーキテクチャにつながるものと期待される。

同様の議論は量子コンピュータに対しても展開することができ、その場合には「状態」とは複数の量子ビットから構成される量子多体系の量子状態のことを指す。熱力学と異なり量子力学にはハイゼンベルグの不確

定性原理という形で速度限界の議論がもともと埋め込まれているが、情報伝播に与える制限としてはリープ・ロビンソン限界が知られている。この限界が現実の量子コンピュータでの計算速度に与える影響の評価や、この限界を考慮した量子回路の設計などは挑戦的な課題である。また、大規模な量子コンピュータの実現には、量子誤り訂正のように所望の精度で量子状態を制御するために連続的に測定しフィードバックを行うことが重要となるが、このような状況での情報熱力学の研究は未開拓の部分も大きい^[83]。量子版「マクスウェルのデーモン」のような設定から始め、量子系における情報の熱力学の一般的な理解の確立が求められる。

量子力学の不確定性原理は、熱力学の速度限界とも深い関係にある。量子版の速度限界である時間とエネルギーの不確定性関係（一つの表現）は量子情報幾何における量子フィッシャー情報量を用いた「量子クラメル・ラオの不等式」の特殊な場合であり、これは（古典）情報幾何学におけるフィッシャー情報量による速度限界の量子版拡張と見なせる^[84-86]。情報幾何学と量子情報幾何学の重要性については3.3節で述べる。

理論的な取り組みに加えて、材料、デバイス、電子回路、生体系などさまざまなアプローチからの実験研究や工学的な研究も重要である。その一部は、情報熱力学における理論的な発見を実験検証することだけにとどまらず、将来的な新しいコンピュータシステムの構成要素にもなりうるため、工学的な研究も必要である。実際、情報熱力学はマクスウェルのデーモンのパラドクスの解決といった理論的な進展だけでなく、実験技術の革新によりさまざまな物理系で実際に情報処理と密接に関連する系での熱力学的なコストが分析・実験検証されている^[7,9,87-91]。今後は、これらの新しいクラスのデバイスの開発と並行して、その動作の数理的なモデリング、設計・製造のためのシミュレーション手法の拡充などへとつなげていく必要がある。また、計算機システムとして統合するためには、これらの新しい概念や要素技術をアーキテクチャ設計に取り入れられるように設計ツールや方法論を準備する必要も出てくるだろう。この方向での研究開発課題としては、プログラミング言語やハードウェア記述言語、コンパイラなどのほか、計算速度・精度と電力消費のトレードオフを評価するベンチマークタスクや指標も重要となる。

	古典系	量子系
物理	<p style="text-align: center;">計算 = 状態遷移</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">熱力学的状態</div> <div style="font-size: 2em; margin: 0 10px;">➔</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">熱力学的状態</div> </div> <ul style="list-style-type: none"> ・ マスター方程式 (マルコフ過程) ・ Fokker-Planck方程式 	<p style="text-align: center;">計算 = 状態遷移</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">量子状態</div> <div style="font-size: 2em; margin: 0 10px;">➔</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">量子状態</div> </div> <ul style="list-style-type: none"> ・ ユニタリ行列 (量子ゲート操作) ・ Schrodinger方程式
情報	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">確率分布</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">確率分布</div> </div> <p style="text-align: center;">分布の距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ KLダイバージェンス ・ ワッサースタイン距離 	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">密度行列</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">密度行列</div> </div> <p style="text-align: center;">分布の距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 量子Fダイバージェンス ・ SLD計量 など

図3-2 物理学の視点で見た「計算」

(2) 非平衡統計力学の機械学習への応用

機械学習にはさまざまなフレームワークがあるが、近年研究が最も進んでいるのは多くの隠れ層を持つ深層ニューラルネットワークによる深層学習である。深層ニューラルネットワークは、画像認識、音声認識、自然言語処理、強化学習など様々なタスクで成功を収めているが、そのような「うまくいく」ニューラルネットワークの構成法は経験則に依拠しがちで、理論的な基盤は未成熟なままである^[92]。とりわけ学習メカニズムは未解明の部分が多く、ブラックボックスのまま使われていると言える。深層学習ではしばしば訓練データ数を大幅に上回るようなパラメータ数で学習を行うが、このような設定で意味のある学習が実現している理由は未解決問題とされている。典型的なパラメータ数は数億個であり、訓練データの数を何桁も上回るため、全ての訓練データを完全にフィッティングすることができることになるが、それでも過学習は生じない。また、ネットワークを拡大しパラメータ数を増やせば増やすほど汎化性能が向上する理由も未解明である^[93]。統計力学と深層学習の交点にある最近の研究のいくつかは、深層ニューラルネットワークの学習メカニズムについての理論的洞察を提供し始めており、機械学習モデルの改善も期待される^[94]。

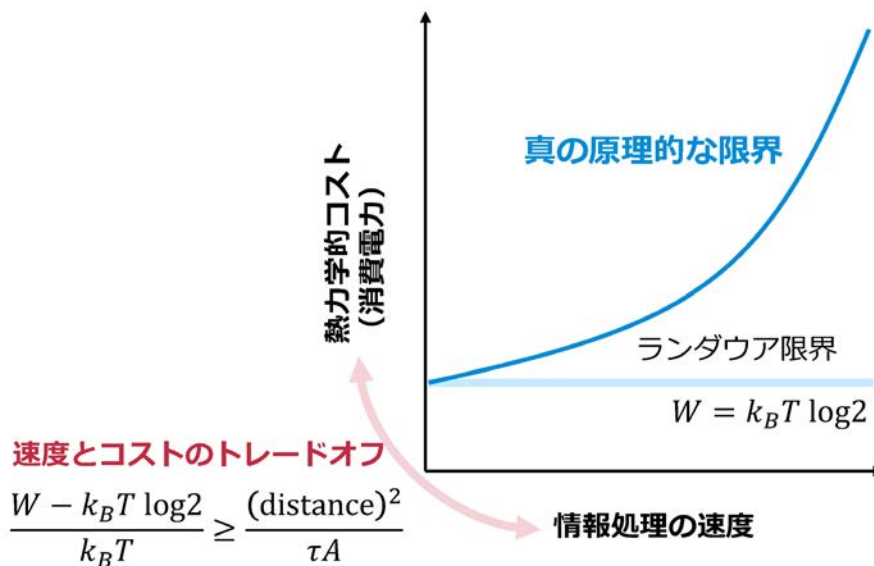


図3-3 ランダウア限界と真の原理的な限界

深層ニューラルネットワークの最適化の初期値はランダム行列であり、平均場理論によりニューラルネットワークの典型的挙動を表す秩序変数を導出するなど統計力学のアプローチによる理論解析が可能である。過剰パラメータ領域での勾配法の大域的収束性については、ニューラルタンジェントカーネル（NTK）の提案と前後して、2018年頃から理論的な解析^[95]が急速に進んだが、その中で汎化性能をジャミング転移の物理と対応付けて理解する試みもなされた^[96]。ジャミング転移は粉体などのマクロ粒子系があるしきい値密度より上で剛性を獲得するという液体（のような状態）から固体（のような状態）に変わる転移である。また、損失関数のランドスケープの形状の解析についてもスピングラスなどランダム系の統計力学で培われたアプローチが有効である^[13,16]。

深層ニューラルネットを用いた教師なし機械学習については、教師あり機械学習に比べてさらに理論的に未成熟の状況である。物理学と関係が深く、古くから用いられている確率モデルはボルツマン分布に基づくボルツマンマシンであり、直接的にイジングスピンモデルにマップできる。ボルツマン形式の確率分布を用いると、対数尤度を最大化する学習プロセスは、モデル分布の全体的な自由エネルギーを増加させながら、観測されたデータのエネルギーを最小化することに対応付けられる（カルバック・ライブラー情報量はギブスの自由エ

エネルギー差と対応する)。このようなエネルギーベースのモデルは現在でも生成モデルに積極的に用いられている^[97]。制限ボルツマンマシンはエネルギー関数の学習に課題を抱えていたが、近年、ランジュバン方程式（統計力学において、あるポテンシャルの下でのブラウン運動を記述する確率微分方程式）を用いる新手法の提案がなされ注目されている^[98]。

情報理論や計算理論が扱う問題に統計力学の概念やツールを用いてアプローチする情報統計力学も極めて関連が深い分野である。統計力学がこれまで対象としてきたガラスやスピングラスなどの系の自由エネルギーランドスケープと組合せ最適化問題の利得ランドスケープは似ていると考えられており、組合せ最適化問題の解析や、それに対する近似アルゴリズムの性能評価（精度や収束の速さ）に統計力学の手法が用いられている^[13,99]。周辺分布を計算する近似アルゴリズムである確率伝搬法も物理に着想を得たものとされている。

非平衡統計力学と機械学習をつなぐ研究は、両方の分野に利益をもたらす可能性が高い。有望な方向性として、物理システムを情報処理エンジンとして扱うアプローチが考えられる。特に注目されるのは、非平衡熱力学に基づく生成モデル（拡散確率モデル）の発展である^[100]。2020年に提案されたデノイズング拡散確率モデルでは、変分オートエンコーダー（VAE）や敵対的生成ネットワーク（GAN）ベースの画像生成AIを超える高精度の画像を生成できることで大きな注目を集めた。拡散モデルでは、画像にノイズを加えていくプロセスを逆にたどり、正規分布と等しい確率密度関数を持つノイズ（ガウシアンノイズ）を出発点に、少しずつノイズを除去していくリバースプロセスによって画像を生成する（図3-4）。このリバースプロセスを深層学習でモデル化することで（画像データを復元した際の誤差が小さくなるように学習する）、高性能な画像生成モデルを実現している。2022年に発表された潜在拡散モデル^[101]は拡散プロセスをピクセル空間ではなくVAEの潜在空間で実行することにより、画像生成の処理を高速化した。個人のPCでも動作するモデルをオープンソース「Stable Diffusion」^[102]として無料公開したことで話題を呼んだ。

現在の理論的理解は今後数年間で出現する、より統一された全体像からすると氷山の一角にすぎないだろう。しかし、この目に見える小さな部分でさえ、深層学習の理解と新展開における統計力学アプローチの有効性を明らかにしたことは特筆に値する。深層学習の理論解析では、ここに挙げたランダム系の相転移、カオス、スピングラス、ジャミング、ランダム行列などの統計力学における概念や手法だけでなく、後述する情報幾何などの数理科学的なアプローチも重要である。

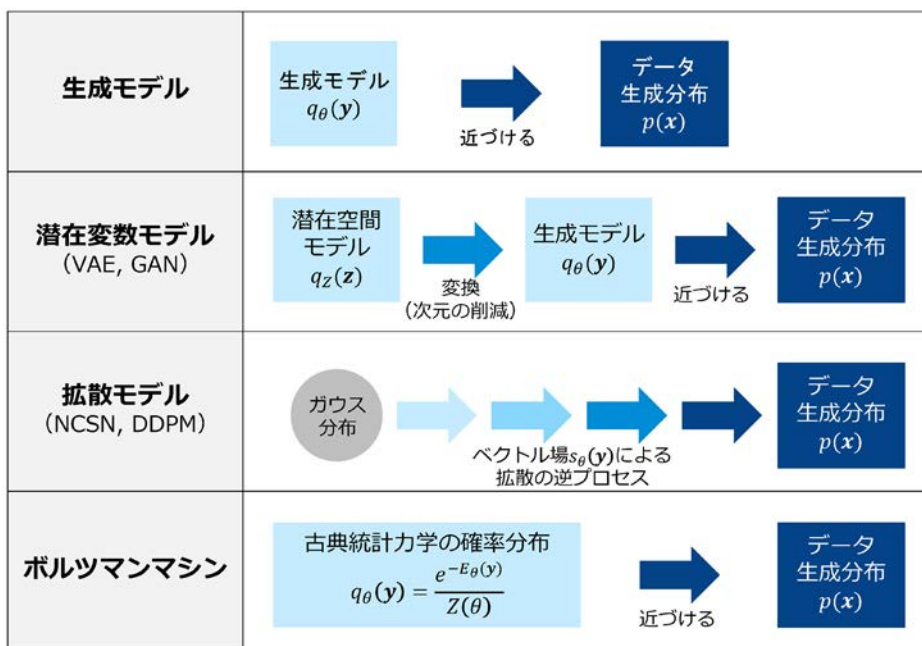


図3-4 生成モデルの進展

コラム

効率と仕事率

熱機関のスピードを考える上では「効率」「仕事率」という似て非なる量の理解が重要である。熱機関とは熱を仕事に変換する装置の総称で、多くの場合、図のように2つの熱浴に接して周期的に運転する熱機関（外燃機関）を考える。この熱機関は得た熱量全てを仕事に変換できるわけではなく、その変換率のことを「効率（熱効率）」と呼ぶ。

温度 T_{high} の熱浴から熱 Q_{high} を吸収し T_{low} の熱浴に熱 Q_{low} を放出することで、その差を仕事として取り出す熱機関を考える。1回の周期で取り出される仕事は $W = Q_{\text{high}} - Q_{\text{low}}$ なので、効率は

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{high}}} \leq 1 - \frac{T_{\text{low}}}{T_{\text{high}}}$$

となる。一方、熱機関の「仕事率（パワー）」とは単位時間にどれだけの仕事を取り出せるかであり、サイクルの周期を τ として仕事率 P は

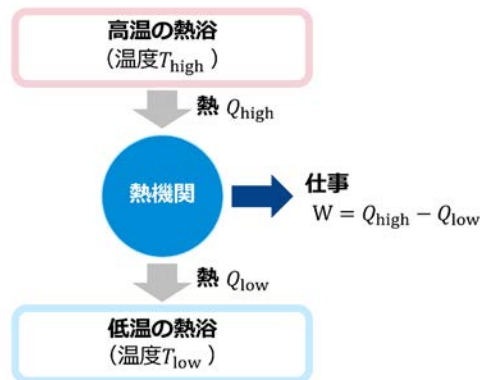
$$P = \frac{W}{\tau}$$

である。この仕事率についての熱力学の法則による原理的制限はない。

原理的に可能な最大の効率（カルノー効率）

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{\text{low}}}{T_{\text{high}}}$$

を達成する機関は全てのプロセスを準静的に行う「カルノー機関」であるが、周期は無有限大 ($\tau \rightarrow \infty$) なので仕事率はゼロである。カルノー効率を達成しつつも仕事率がゼロでないような熱機関は存在しないことが分かっている^[77]。この結論は量子・古典を問わず成立するが、量子の場合にはこの制限を実効的には無効化できることが近年報告され話題となっている^[103, 104]。論文では、量子効果を適切に用いることで、カルノー効率を漸近的に達成しつつ仕事率がゼロでないプロセスの存在が示されている。このような量子熱機関は、量子系の冷却やナノスケールのエネルギー輸送などに応用できると期待される。



3.2 情報学・計算機科学の概念・手法を物理学に应用する

(1) 量子情報理論の熱力学への応用

量子情報理論は量子系の性質を理解するのに役立ったが、その実用的なアプリケーションは（古典の）情報理論ほど普及していない^[23-25]。大規模な量子状態を精度よく作成したり、それを誤りなく遠方へ伝送したりする量子技術の水準がまだ実用化レベルに達していないのである。これらの技術的な制限を動機に生まれたのが「リソース理論」と呼ばれる量子情報理論の考え方である。

リソース理論は、制限された物理操作の下での量子情報処理を考える枠組みで、「ある状態を別のある状態に移させる際に、フリーな（＝コストを払わずにタダで手に入る）操作や状態とは別にコストのかかるリソースがどのくらい必要か」といった問題を扱う。フリーな操作やリソースの定義は、リソース理論を何に適用するかに依存し、たとえば「エンタングルメントのリソース理論」では、実装が容易であると見なされる局所操作と古典通信（LOCC）をフリーな操作、エンタングル状態をリソース状態として秘密鍵の共有などのタスクを実行するのにどれだけのリソースが必要かを見積もる^[105]。フリー操作は量子力学が許容するすべての物理プロセスを網羅しているわけではなく、ある制約条件の元で実現可能な特定の量子状態のみを準備できる。このようにフリー操作によって作ることができる状態はフリー状態、そうでない状態はリソース状態と呼ばれる。したがって、リソース理論はすべての操作と状態を「フリー」か「禁止されている（＝リソース）」かに分類した上で、制約条件のもとでのリソースの使用を考える理論枠組みと理解できる。エンタングルメントのリソース理論の他にもコヒーレンスのリソース理論や、対称性のリソース理論など、様々なリソース理論が提案され、その考え方は量子情報の研究コミュニティに急速に広まっている^[106,107]。

量子情報科学で生まれたリソース理論の考え方を熱力学に応用する「熱力学リソース理論」^[108]という新たな分野も生まれた。リソース理論の考え方は熱力学における基本的問題のいくつかに新たな光を当てる研究へと繋がり、熱力学の基本法則の情報理論的な理解を深化させる研究が活発に行われている^[109-111]。

熱力学リソース理論における典型的な設定は、「熱浴と相互作用して時間発展する操作」をフリー操作とし、「外部に対して仕事をできる状態」をリソースとする。フリー操作によって実現可能な状態はボルツマン分布（ギブス分布）である。したがって熱力学リソース理論では、注目している系の初期状態が熱浴に触れて時間発展し、終状態に達する場合に外部（リソース）からどれくらい仕事をされるか（または、外部にどれだけ仕事をするか）を考えていることになる。熱力学へのリソース理論アプローチは、熱力学の適用範囲をマイクロ系に拡張するだけでなく、熱力学第二法則に関わる数理構造を情報理論の観点から整理することにも成功した。

さまざまなリソース理論の中で熱力学との関連が深いものに「非対称性のリソース理論（resource theory of asymmetry）」がある。これは、ある保存則を満たす操作をフリー操作とし、リソースを使ってどれほど保存則を破る操作（保存量の異なる固有値を持つ固有状態への遷移）ができるかを、異なった保存量をもつ固有状態間の量子コヒーレンスに注目して考える枠組みである。物理的操作は基本的にはエネルギー保存則を満たすので、熱力学の操作もこのコヒーレンスに関する制約を受けているはずである。実際に、量子系では熱的操作（ギブス状態の補助系とエネルギー保存則を満たす写像）はギブス保存写像（ギブス分布をギブス分布に移す写像）よりも狭いクラスの操作だと知られている。コヒーレンスに関する制約は、コヒーレンスの蒸留が不可能であること^[112]や、触媒を用いてもインコヒーレントな初期状態にコヒーレンスは作れない^[113,114]という結果が得られている一方で、何度でもリサイクルできる外部系^[115]や複数の相関した触媒^[116]などの利用によりどんな状態変換も可能になるという結果も報告されている。他にも、保存則や対称性が量子ゲートの実装や量子誤り訂正符号、ブラックホールからの情報脱出などに与える制約を解析でき、非対称性のリソース理論は本プロポーザルで扱う様々な対象に統一的な視点を与えうるものとして注目される^[117-120]。

今後、相互作用する多体系などの現実に近い系についての理論・実験両面からの熱力学リソース理論の研究が必要である。熱ゆらぎのエネルギースケールでのマイクロな系の非平衡熱力学や情報熱力学に加え、量子

力学的に相互作用する多体系（量子多体系）の熱力学への応用も求められる。量子情報処理の観点からは、誤り耐性量子コンピュータや長距離の量子通信などの実現には量子多体系の熱力学的な理解と制御が不可欠だと考えられる。量子シミュレータで実現される人工量子系の非平衡ダイナミクスや、強相関電子系や量子ホール系などで実現される新しい物性現象などの理解や工学応用の面からも、量子多体系の非平衡熱力学の確立は極めて重要である。リソース理論は量子通信の文脈で利用されてきた経緯もあり、元々の動機は「いかに少ないリソースで最大の効果を得るか」という極めて実用的なものである。現実的な制約条件の下で、熱力学的な仕事率や効率と熱力学的状態や量子状態の遷移の限界をより深く理解し、最適な遷移の方法を見つけることはほぼ直接的に計算のエネルギー効率向上に貢献するだろう。

図2-1に示したように、熱力学と量子力学という物理学の二本柱とも言える分野は量子情報科学が登場する前から互いに概念やアイデアを交流させながら発展してきた。量子情報科学の概念や考え方は熱力学・統計力学の基礎づけにも有望なアプローチとなる可能性がある。情報理論は熱力学の数学的バックボーンである統計力学の基本的な問題にも光を当てた。おそらく最も初期の重要な貢献のひとつは、ジェインズによって導入された最大エントロピー原理だろう。ジェインズは、情報理論のツールを使用して微視的な力学的法則（古典・量子）から統計力学の方法を正当化する問題に取り組んだ。実際、量子力学から熱力学・統計力学を導き出す試みは、フォン・ノイマンの研究から始まる量子力学自体とほぼ同じくらい長い歴史を持つ。現在でも進行中の活発な研究分野であり、量子情報コミュニティからも注目を集めている。

従来、ミクロな古典力学からマクロな熱力学を導出するには統計力学を経由することが一般的であった。ミクロ系の熱力学であるゆらぎの定理から熱力学第二法則を導出する過程でも、熱浴の初期状態にカノニカル分布（統計力学の概念である）を仮定するなど、やはり統計力学を経由することでミクロな量子力学とマクロな熱力学を結びつけていた。しかし、実際の熱浴は必ずしもカノニカル分布をしているとは限らないため、量子力学から直接（＝統計力学を経由せずに）熱力学を創発しようという研究が近年精力的に進められている^[121,122]。特にその焦点となっているのは時間反転に対称な（可逆な）量子力学から、どのようにして時間の向きをもつ（不可逆な）熱力学第二法則が現れるのかという問題である^[123]。

従来の統計力学を経由するアプローチではなく、量子力学だけから熱力学を導出する際の鍵となるのが量子状態がどのようにして熱平衡状態に緩和するかという「熱平衡化（熱化）」の理解である。とりわけ、環境から切り離された孤立量子系がシュレーディンガー方程式に従って時間発展したときにどのように熱平衡化するか、理論・実験の両方のアプローチでの研究が精力的に進められている^[124]。イオントラップや冷却中性原子などの量子シミュレータ技術が発展し、さまざまな量子多体系の現象を精度良く制御できる実験環境が整ったことも背景にある^[125]。

熱平衡化を説明するメカニズムとして注目されている考え方は「固有状態熱化仮説（Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH）」である^[123,126]。ETHは量子多体系の全エネルギー固有状態が熱平衡状態を表すとする仮説で数学的な証明もないが、いくつかの系では成立していることが数値計算により確かめられている。また、ETHと量子多体系での情報の伝搬速度の上限である「リーブ・ロビンソン限界」という量子情報の概念と組み合わせることで、熱浴の初期状態が（統計力学のカノニカル分布ではなく）量子力学のエネルギー固有状態の場合にも熱力学第二法則とゆらぎの定理が短時間では成立することも数学的に証明されている^[122]。ETHにより統計力学を経ずに量子力学から熱力学を直接導き出すシナリオが明らかになりつつあり、今後、孤立量子系の熱平衡化のメカニズム解明は飛躍的に進むものと期待される。

またETHのみでは熱平衡化が説明できないと示唆する結果も報告されており、多体局在状態（Many-body Localization 状態）^[127,128]や量子多体傷跡状態（Quantum Many-body Scar 状態）^[129,130]など熱平衡化しない量子状態が注目されている。このような非平衡量子相は、対称性の破れで特徴づけられる平衡状態とは異なる新しいタイプの量子相と考えられ、離散時間結晶（Discrete Time Crystal）^[131,132]などを含め相転移の観点からも精力的に研究が進められている。非平衡量子相はエンタングルメントエントロピーの時間発展などで特徴づけられ、近年では様々な実験検証も報告されている。冷却原子や超伝導量子ビットなどの

人工量子系（量子シミュレータ）を用いて探索が進められている新しい非平衡量子相やそのダイナミクスは、将来的な量子情報処理のプラットフォームに繋がると期待される。最先端の量子技術の研究開発には、ETHや熱平衡化のような基礎学理的な問いを深め量子多体系の非平衡ダイナミクスを理解することが極めて重要である。

(2) 量子情報理論の量子物性への応用

量子情報の考え方や手法は物理学全体に急速に浸透しつつあり、物理学と情報学・計算機科学が融合した新しい領域の開拓が進んでいる。とくに、物性物理学における量子系の現象を量子情報の観点から捉えることで、トポロジカル量子相の理解の深化やテンソルネットワークを用いた数値計算法の発展など物性理論を中心に数多くの基礎物理で進展が見られた^[27]。近年では、場の量子論を通じた素粒子物理学や重力理論、超弦理論との交流も進んでいる^[6,30]。

物性物理学における最も基本的で重要な問題は相の分類である。これまで、ランダウ理論に始まる対称性の自発的破れや秩序パラメータなどの概念による分類が多くの成功を収めてきた。統計力学では相転移は系の対称性の変化だと理解でき、絶対零度での相転移である量子相転移も自発的な対称性の破れによって説明できると考えられていた。しかし、分数量子ホール効果（図3-5 左下）の発見を皮切りに対称性を保ったまま量子相転移が生じる系が見つかり、新しい相分類方法が求められていた。とくに「トポロジカル秩序相」と呼ばれる量子相は、縮退した基底状態はどれも対称性を破っておらず通常の秩序パラメータでは特徴づけができない。また、対称性の下でのみ自明な相と区別される「対称性によって保護されたトポロジカル（SPT：Symmetry-Protected Topological）相」（図3-5 右下）の特徴づけも重要である。これらの物質の量子相の分類は長年物性理論の研究者を悩ませてきたが、量子情報理論におけるエンタングルメントや計算複雑性の考え方が輸入されると極めて見通しよく理解されるようになった^[27]。量子相を特徴づける方法はいくつかあるが、例えば積状態などの自明な状態から定数深さの量子回路による操作で対象となる量子状態が作れるかどうかで量子相を分類する方法がある。基底状態がトポロジカル秩序相かどうかを判断するのに、複雑性を測る指標であるトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーが用いられるのも好例といえよう^[133,134]。

トポロジカル秩序相は理想的な量子情報処理プラットフォームとしても注目されている。これは、トポロジカル秩序を持つ2つに縮退している量子状態は、どのような局所的摂動に対してもその縮退が解けず、対称性も破れないため、それらの重ね合わせ状態が外乱に対してロバストに保持される性質による。トポロジカル秩序を記述する具体的なモデルとしてはキタエフのトリーク符号モデル^[135]が知られているほか、二体相互作用から構成されるマヨラナモデル^[136]やハニカムモデル^[137]も提案されている。

量子回路複雑性のほかにも、複雑性クラスや決定可能性など計算複雑性理論の概念や手法をより直接的に物理に持ち込む研究も盛んに行われている。例えば、ある量子多体系を表すハミルトニアンが与えられたときに、その基底状態と第一励起状態の間にエネルギー差（ギャップ）があるかどうかを決める問題は決定不可能だと示されている^[138,139]。また、そもそも基底状態のエネルギー固有値を求める問題はクラスQMAという（量子コンピューターでも効率よく解けない）難しい問題だと知られている。多体局在状態や量子多体傷跡状態など熱平衡化しない量子多体系があることは先述したが、このような与えられた孤立量子系が熱平衡化するかどうかを判定する問題も決定不可能だと近年示された^[140]。

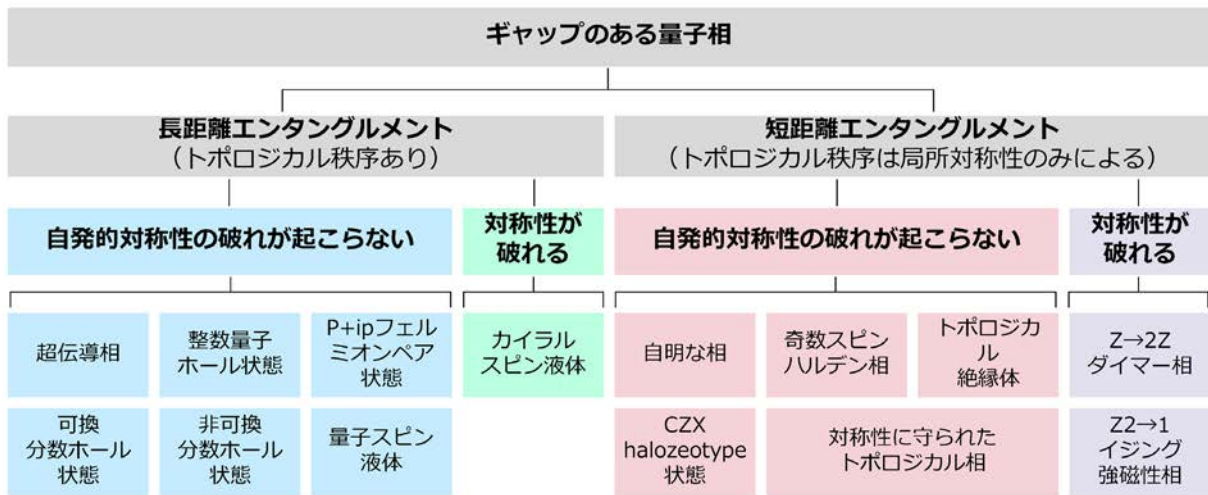


図3-5 物質の量子相の分類 (文献 [141] を参考にCRDS作成)

量子情報の考え方をを用いた量子物性物理と量子情報処理のための量子技術は、量子状態の変化を情報処理として理解するか利用するかというモチベーションの差にすぎず、その本質は量子情報を共通言語とした物理学である。量子誤り訂正符号や量子回路複雑性をきっかけとした量子情報と量子物性の交流は今もなお続いており、今後も量子相の理解の深化や新奇物性の予言と実験検証が期待できる。トポロジカル符号による誤り耐性量子計算は、量子ビットの二次元配列を用意してその上にトーリック符号（表面符号）を実装するという量子情報アプローチと、物質のトポロジカル秩序相で実現されるマヨラナ準粒子を制御するという量子物性アプローチの両面から研究が進められている^[142]。

量子多体系の量子シミュレーションによる新たな量子現象の探索も重要な研究開発課題である^[125]。イオントラップや冷却中性原子といった量子シミュレータプラットフォームが充実しつつあり、モット絶縁体^[143]や長距離相互作用^[144]など物性物理で扱われる理論モデルがそのパラメータを精密制御可能な系で再現できるようになってきた。今後は固体物理における量子物性現象の再現を越えて、固体物理では実験することが難しい現象やパラメータ領域へのアプローチが望まれる。実際、量子シミュレータを用いたエンタングルメントエントロピーの測定^[145,146]や、多重局在状態、量子多体傷跡状態、離散時間結晶などの非平衡量子相の量子シミュレーション^[128,130,132]が報告されているほか、超伝導量子コンピュータ用のチップを量子シミュレータとして用いることも試行されている^[147]。量子多体系の動的な性質（ダイナミクス）の研究は量子物性系が量子情報をどのように処理・伝達しているのかを明らかにすることに直結し、量子情報処理の原理の理解が深まると期待できる。量子物性・量子情報のどちらのアプローチをとるにせよ、実験による研究が重要である。単なる理論予測の検証を超えた、理論と実験の両輪での研究開発推進が望まれる。

表3-1 量子シミュレータ上の量子物性 (文献 [125] を参考にCRDS作成)

物理量	固体中の電子	冷却原子 (量子シミュレータ)
統計性	フェルミオン	ボゾン、フェルミオン
スピン	1/2	整数、半整数
有効質量	m_e	$> 10000 m_e$
格子定数	~0.5 nm	~500 μm
フェルミ温度	~10000 K	~100 nK
相互作用	クーロン相互作用	ファン・デル・ワールス相互作用

量子重力理論におけるホログラフィー原理や、時間に依存する系への相対エントロピーの応用も盛んに議論されている。反ドジッター時空 (AdS) 上の重力理論と、その境界上に住んでいる重力を含まない共形場理論 (CFT) が等価になることを主張する「AdS/CFT 対応」は、共形場理論から重力理論が創発することを示唆する。エンタングルメント・エントロピーが重力理論の宇宙における曲面の面積に等しいことが分かり^[148]、量子エンタングルメントから重力理論の宇宙が創発するという考え方が生まれ注目されている^[6]。さらに、共形場理論における相対エントロピーを使うことでAdS 時空上の重力のダイナミクスを読み取れることがわかってきた。テンソルネットワークとの関係も指摘されている。またブラックホール情報喪失問題において「スクランプリング」とよばれる、熱平衡状態における量子情報の急速な脱局所化現象が本質的な役割を果たすことがわかり、この現象を検出する手段としての相対エントロピーの有用性も指摘されている^[149]。

物理学ではこれまで、素粒子・宇宙・物性など縦割りに分野が分かれて研究が行われてきた。しかし、近年量子情報の考え方がこれらの分野に横串を通し、宇宙創成から量子物質までさまざまな物理学の重要な研究対象の難問を解決する鍵となることが分かってきた。量子物性に見られたような進展と全く同じような進展が、量子重力の研究でも見られており、量子情報の言葉を使いこなす事は前提知識となっている。今後、量子情報は、現代物理学を研究する上での「文法」あるいは「常識」のようになり、各分野に組み込まれていくだろうと考えられる。

3.3 物理学と情報学・計算機科学をつなぐ数理基盤を構築する

(1) 微分幾何の展開

微分を利用した幾何学である微分幾何学の重要な対象は多様体であり、計量によって局所的にユークリッド空間と同じように扱うことができる。情報幾何学は確率分布の空間に構造を導入することで、確率分布を扱う様々な分野の問題に統一的な視点を与える。情報幾何学が対象とする多様体は、確率分布全体のなす多様体である統計多様体であり、フィッシャー計量の導入により確率分布間の違いや統計的性質を測ることができる^[19]。情報幾何学の考え方をを用いることで統計学における統計モデルの情報量や統計量の充分性、推定量の有効性など様々な概念の統一的理解が得られるようになったばかりでなく、情報理論や信号処理、近年では機械学習にも大きな影響を与えてきた^[20]。

前節までで述べたように、物理学から見た情報処理は熱力学的状態 (統計力学では確率分布で記述される) の遷移であり、これは明らかに情報幾何学の枠組みと整合している。実際、熱力学でのエントロピー生成率がカルバック・ライブラー情報量を用いて記述されたり、確率過程で記述される熱力学的ダイナミクスを理解する上で時間に関するフィッシャー情報量 (情報幾何学における確率単体上の速度の指標) が重要となったり、ミクロな系の熱力学 (ゆらぐ系の熱力学) の法則の背後には情報幾何学の視点が自然な形で埋め込まれていることが知られている^[21]。非線形力学系や化学反応ネットワークなど、これまで情報幾何学がアプローチしてこなかった熱力学・統計力学上の問題はまた無数にあり、これらの問題への情報幾何学の視点の導入は、情報幾何学にも新たな展開をもたらさうと考えられる。情報幾何学は、今後も物理学と情報学・計算機科学の間の共通言語的な役割を担うと期待される。

情報幾何学の量子版である量子情報幾何学もまた長年にわたり研究され、現在も発展を続けている分野である。量子力学の数学的体系は確率論の拡張とみなすことができ、量子状態全体のなす多様体にフィッシャー計量の類似を導入することができる。従来の情報幾何学ではフィッシャー計量がただ一つのリーマン計量だったのに対して、量子情報幾何学では多くのリーマン計量が定義できる状況にあり、問題ごとに個別に定義される幾何構造に対して統一的な描像が得られるかという問題がここ20年の大きな課題となっている^[22]。従来の情報幾何学と量子情報幾何学の差異は量子力学がもつ作用素の非可換性に起因しており (量子状態を

表す密度行列は数学的には半正定値行列で表現される)、情報幾何学での双対平坦構造が量子情報幾何学ではなくなることで幾何学として複雑な構造を持つと理解される。量子版に拡張することの情報理論的な差異は、統計的推定理論にも現れる。例えば、従来の統計学でのパラメータ推定問題では、クラメル・ラオ定理によりフィッシャー行列（の逆行列）が局所不偏推定量の共分散行列の達成可能な下界を与えていたが、量子版では推定量の非可換性のためにそのような共分散行列の達成可能な下界というものがないことが知られている^[22]。このように量子情報幾何学と量子推定理論、量子情報幾何学と不確定性原理など、量子状態の遷移や量子計算という共通の現象を別々の視点から見たときにどのように対応付けられるか、相互関係を精緻に明らかにしてゆく方向の研究が必要であろう。

最適輸送理論も、情報学・計算機科学と物理学の間をつなぐ普遍的な考え方を提供すると考えられる。とりわけ統計力学の問題設定の多くは、数理的には最適輸送理論で扱える。最適輸送理論は、複数の工場と複数の店舗があったときに商品を運ぶためのコストを最小にする方法を求めるという理論枠組みであり、連続の場合には確率分布の間の「移動」を最小にする最適化問題に帰着する。確率分布の間の距離を測るのがワッサースタイン距離である（カルバックライブラー情報量とは異なり、ワッサースタイン距離は距離の公理を満たす）。今後は、統計学や機械学習でこれまで多く用いられてきたフィッシャー計量とワッサースタイン計量を適切な設定のもとで統一的に扱う「ワッサースタイン情報幾何学」ともいべきフレームワークの構築が必要である。ワッサースタイン計量とフィッシャー計量をつなげることは、そのまま情報学と物理学をつなげることに直結している。そのような俯瞰的理論である「ワッサースタイン情報幾何学」の創造に向けた取り組みは、情報学や物理学だけでなく、数理科学上の重要な発見を生み出す可能性も秘めている。

情報幾何学や最適輸送理論はいわば情報の幾何学であり、実際、機械学習（EM アルゴリズムやワッサースタインGAN、深層生成モデルなど）に応用されている^[20]。深層生成モデルの一種である拡散モデルは非平衡統計力学のアイデアに基づいたもので、画像生成モデルStable diffusion に用いられている^[101]。さらに熱力学的な状態遷移をこれらの2つの幾何学で捉えることで、熱力学のコストと正確性やスピードとのトレードオフが得られる。ここでは、古典と量子の間に考える省エネルギーな熱力学的コンピューティングの設計という研究の方向性がある。このような意味で物理学と情報学・計算機科学の幾何学の相補的な発展が期待できる。

教師あり機械学習のひとつであるベイズ学習は、代数的構造と多様体という幾何学的構造を兼ね備えた「リー群」を利用することで改良できると期待されている。例えば、ベイズ学習におけるアップデートルールは全て統計多様体上の最急降下法で説明されるが、一部分で微分幾何学におかしな操作をしている。ここにリー群からの作用を入れパラメータ付けをすることで克服が可能だと知られている。リー群からの作用はさまざまなものがあり、より表現力の高い学習を目指したリー群の考え方の機械学習への適用研究が重要である。

(2) 位相幾何の応用

位相幾何学（トポロジー）は形を連続変形しても変わらない特徴に着目したものである。例えばドーナツは連続変形しても、サッカーボールにはならない。このような「形」を区別するための代数的道具が（コ）ホモロジーである。位相幾何学では（コ）ホモロジーのベクトル空間としての次元により「穴」の数を測ることができる。

統計力学を数学的に基礎づける手法の一つである流体力学極限¹において、ミクロモデルの汎用的記述に対するコホモロジーを用いた解析により、保存量の定式化や群作用の役割の抽出、相互作用の局所性が果たす役割の抽出など様々な理解が得られており^[150]、今後も数学的理論の発展が望まれる。

1 オイラー方程式やナビエ・ストークス方程式などの流体の方程式を統計力学のボルツマン方程式から導出する際に用いられた経緯からこの名前がつけられた。

コホモロジーはまた、複雑な化学反応ネットワークの縮退に用いられている^[151]。縮約したより小さなネットワークが元の化学反応系の定常状態を再現することがわかっているが、反応速度など非平衡の状態を考慮するためには新しいコホモロジーが必要である。トポロジーを用いた原子と光の新奇な制御法は原子と光におけるトポロジカル物性の確立に貢献し、量子制御技術や量子コンピューティングとも密接に関係している^[142]。コホモロジーやトポロジーに関する数学上の重要な結果の大半はまだ情報学・計算機科学や物理学で利用されておらず、まだ見ぬ役割の発見を目指した多様で基礎的な研究の継続が不可欠である。

(3) 非可換幾何の発展

物理学や情報学・計算機科学との直接的な関係や有用性が現時点で分かっていない数理科学上の概念やツールであっても、後になって極めて重要なブレイクスルーにつながる鍵だと判明することもある。数学が持つ考え方や手法の汎用性・普遍性を鑑み、多様な研究に探索的に取り組むことが重要である。

量子力学の数学的側面である作用素環論による「コンヌの埋め込み予想」という重要な予想が量子情報における「チレルソン予想」と同値であることが知られている^[152]が、計算複雑性理論の観点から否定的に解決されたとするプレプリントが出されている^[153]（影響力の強さは文献 [154] に見てとれる）。コンヌの埋め込み予想自体は数学者から否定的に捉えられているが、上記のプレプリントの数学的な理解は得られておらず、進展が望まれる。作用素環論と量子情報の新たなつながりを探索することで計算複雑性理論に関わる全く新しい数学分野の創出も期待できる。

時系列データなど非線形な力学系に対して、再生核ヒルベルト空間（RKHS）を用いて、無限次元だが線型空間に埋め込むカーネル法がある。このカーネル法に対して、RKHS を拡張して再生核ヒルベルト C^* 加群（RKHM）を用いた適用範囲を拡張する研究が行われている。RKHM は C^* 環に値を持つ内積を備えているものであり、 C^* 環は作用素環の一種である。今後は量子計算などへの応用が期待される。

作用素環論はコンヌの提唱する非可換幾何の枠組みを与える。この中で K 理論を展開することで、トポロジカル機能性材料への応用が期待される。さらに、これらの背後には圏論がある。圏論は対象とその間の関係を統一的に捉える数学におけるフレームワークである。圏論の役割は対象全体の抽象的な定式化を与えることと、異なる対象どうしを関係も含めて繋ぐことである。量子力学ではモノイダル圏が対象であり、圏論の視点の導入により量子計算などの見通しが明確になることはよく知られている^[155]。今後は、異なる対象どうしを関係まで含めて繋ぐという方向への圏論の活用が重要な課題である。

コラム

いろいろなエントロピー

物理学史に「エントロピー」の言葉が登場するのは産業革命後の19世紀初頭であった。カルノーによる熱機関の研究からジュールやクラジウスらによる改良を経て熱力学が1870年代に完成。エントロピー $S = Q/T$ (Q は熱量、 T は温度)は熱力学の中で重要な役割を果たし、保存則や非可逆過程での増大則など基本的な性質は分かっていたものの正体は不明であった。

19世紀後半、ボルツマンはマクスウェルの気体分子運動論を発展させ、エントロピーのミクロな力学からの説明に挑戦した。彼は分子の統計分布 $f(\mathbf{v}, t)$ (\mathbf{v} は速度、 t は時間)を用いて H 関数

$$H(t) = \int f(\mathbf{v}, t) \log f(\mathbf{v}, t) d^3v$$

という量考えた。ボルツマンは $H(t)$ が時間とともに単調減少する (H 定理) と明らかにし、エントロピーが $S(t) = -k_B H(t)$ で書けることを示した (k_B はボルツマン定数)。 $f(\mathbf{v}, t)$ にマクスウェル分布を代入すると理想気体のエントロピーが得られる。有名なボルツマンの公式は、この研究過程で得られたものである。こうして「確率分布」の考え方が物理学に持ち込まれた。

シャノンは実現確率を P_i の事象 X_i から平均的に得られる情報量

$$S(X) = - \sum_i P_i \log P_i$$

を定めた。後にシャノンエントロピーと呼ばれる量で、ボルツマンの H 関数における分子の統計分布 $f(\mathbf{v}, t)$ を確率 P_i に置き換えたような構造をしている (符号は逆)。

量子力学的な相関であるエンタングルメント (量子もつれ) の定量化には、エンタングルメントエントロピーが用いられる。注目する量子系全体は純粋状態で密度行列 $\rho_{\text{total}} = |\psi\rangle\langle\psi|$ で書けるとする。系を A と B の2つに分け、部分系 A についての密度行列は $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{\text{total}}$ と書けると、系 A と系 B の間のエンタングルメントは

$$S_A = -\text{Tr}[\rho_A \log \rho_A]$$

というエンタングルメントエントロピーを用いて評価される。これはシャノンエントロピーの確率分布を密度行列に置き換えたものと同じ形をしており、部分系 A の密度行列に対するフォン・ノイマンエントロピーと理解される。これは全体の状態は一意に決まっても、一部を抜き出したときに実現される状態には不確定性が残るという量子もつれの性質を端的に表現している。 $|\psi\rangle = |1\rangle_A |0\rangle_B$ のときに $S_A = 0$ で $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_A |0\rangle_B + |0\rangle_A |1\rangle_B)$ のときに $S_A = \log 2$ となることから、エンタングルメントエントロピーは部分系 A と B の間のエンタングルメントが何個分のベルペアに相当するかを見積もる量だとわかる。エンタングルメントエントロピーを実験的に測定することも可能となっており、量子計算や関連技術の根幹をなす量として重要である。

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

4.1 推進上の課題と推進方策の時間軸

本研究開発を進める上では技術的な課題解決以外に、「融合・連携」「人材育成」という2つの面からの推進上の課題の解決を図る必要がある。本プロポーザルは以下3つの方策を図4-1に示した時系列で進めることを提案する。

まず非平衡ダイナミクスの理解に向けて分野融合や連携が必要不可欠だが、ここには2種類の壁がある。一つは物理学と情報学・計算機科学の間にある「inter-disciplineの壁」。もう一つはそれぞれの分野の中にある「intra-disciplineの壁」である(図4-2)。先導的研究会など分野やコミュニティを跨がって問題意識の共有や議論が行える場が必要だろう(4.2 先導的研究会の設立・運営の支援)。実施のための金銭的な支援やオンラインのプラットフォームの準備、勉強マテリアルの作成・公開なども重要である。また、統計力学分野に比べて量子情報分野は海外との連携が必要な分野であり、学際的かつ国際的な交流の場作りや拠点形成も必要だろう。拠点は勉強会やワークショップなどの運営を担うことも期待される。分野融合には共通の帰属意識を持った中での議論の醸成が有効だと考えられ、物理的に同じ場所に集まることは極めて効果的な要素と考えられる。拠点形成については「4.3 国際的研究センターの構築」で述べる。

人材育成の面では、この分野の研究は基礎的なものが多く、達成目標など予め計画するのが難しいことが課題である。5年程度の期限つきでのプロジェクトへの参画では長期展望の見えづらい研究テーマは実施されにくい。基礎的に重要な研究は3年程度の短期間に成果があがらない場合が多い。分野をまたがる融合的な研究の場合にはさらに時間が必要である。例えば5年任期で問題なければ更新して10年程度居られるようなポジションが必要だろう。この点は「4.4 長期的視点のプロジェクト」で詳しく触れる。

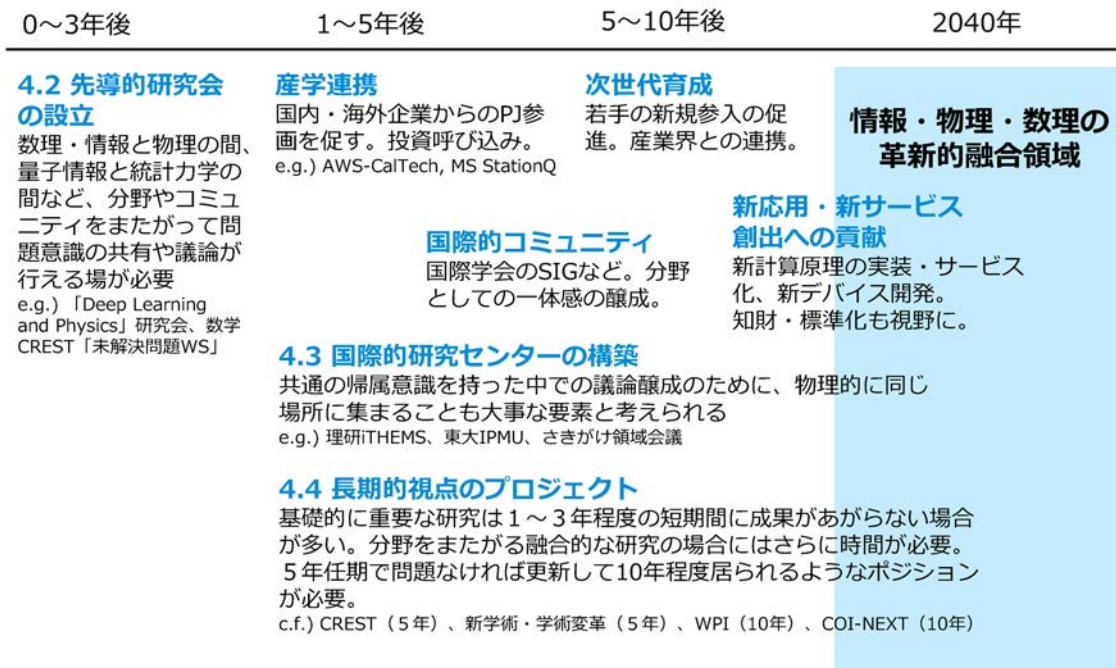


図4-1 各施策の時間軸



図4-2 分野融合を妨げる2つの「壁」

4.2 先導的研究会の設立・運営の支援

本プロポーザルが創出を目指すのは情報学・計算機科学と物理学との融合領域である。現状では情報学・計算機科学と物理学の研究者間の交流は希薄で、情報学・計算機科学や物理学のそれぞれの内部でさえ小分野に別れ互いに壁がある。このため、内容や方向性が共通している場合があるにもかかわらず、お互いに知見の共有や交流がなく、別々に研究していることも多い。また、それぞれの分野で用いられるテクニカルタームや分野の研究者が暗に前提としているような非明示的の仮定があるなど、互いの動機や経緯、研究内容とその意義を簡単には理解しにくい。

このような課題の解決には、さまざまな分野の研究者が相互に情報交換し議論できるような場を設けることが重要である。研究会やワークショップなどで共通の課題を研究する異なる分野の研究者を集め、そこで分野を超えた議論、意見交換を行える場を設定することが望ましい。本プロポーザルでは分野やコミュニティを跨がって問題意識の共有や議論が行える戦略的な場として「先導的研究会」の設置・開催を提案する。

開催にあたっては、知の新領域を創出するモードに多様性がある点に配慮する必要がある（図4-3）。これまでの知の創出は確立した学術分野の中での動機や意義によるものが中心だったが、近年の知への需要は現実世界の問題が動機となっている。環境問題はその最たる例だが、ITの消費電力の問題もまさにそのような新たな知の創出を促しうる現実世界の問題だと考えられる。このような現実問題が新たな知の領域創出を促すときには、既存分野の先端を拓く先端知（アドバンスト）に加えて、学際知（インター）、横断知（トランス）、融合知（フュージョン）、間隙知（ニッチ）、および、上位知・俯瞰知（メタ）といった6つのモードがある^[156]。

- ・ 先端知（フロンティア）：各ディスプリンの先端部分の知。
- ・ 学際知（インター）：複数の分野をまたぐ知。
- ・ 間隙知（ニッチ）：複数の分野の隙間に位置する知。
- ・ 融合知（フュージョン）：拡張する複数の分野が融合した領域の知。
- ・ 横断知（トランス）：複数の分野に共通する知。

- ・上位知・俯瞰知（メタ）：複数の分野をメタレベルで包括する知。

先導的研究会を通して、先端知だけではない様々な知のモードを有効活用できるような素養を醸成することが求められる。先導的な学際的研究の遥かなる飛翔は情報学・計算機科学のフロンティア拡大にとどまらず、新しい分野を担う人材育成の面からも長期的なITの発展の先導につながると期待される。実施に当たっては既にあるワークショップや研究会との連携も重要である。

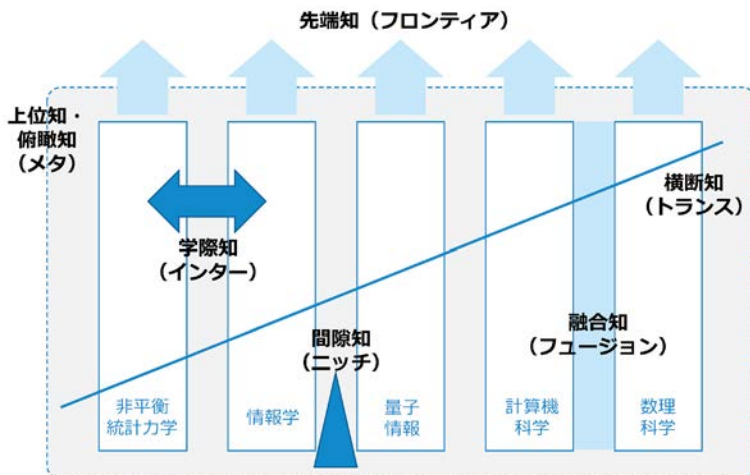


図4-3 知の新領域創出の多様性(文献[156]を参考にCRDS作成)

4.3 国際的研究センターの構築

個々の研究者のバックグラウンド分野は異なり、用いる言語や分野の文化の違いから、十分な相互理解を得るための共通基盤の形成には数年単位の時間が必要となる。したがって、相互理解の時間に加え、融合分野の研究を進めるために、長期間にわたり共通の目的で物理的に同一の場所に結集し、お互いに自由に議論しながら研究を進める環境を形成することが重要となる。そのためには4.2節で提案した「先導的研究会」に加えて、分野融合を継続的に推進・発展させる方策が欠かせない。本プロポーザルでは、複数の領域にまたがるアイデアを日常的に議論する共通基盤を実現する枠組みとして物理的拠点「国際的研究センター」の設立を提案する。この拠点形成に際しては以下の点を重視すべきである。

- ・ 共通の目標や結集させる分野をある程度指定する。
- ・ 共通の目標をもつさまざまな分野の研究者が、長期間1つの屋根の下に結集し、議論を重ね、研究を進める。
- ・ 結集させる分野については、柱となる分野を指定し、その分野の研究者の参加を奨励する。
- ・ 分野間でのコミュニケーションを活発化させる。
- ・ 公式、非公式の会合を長期間にわたり定期的で開催し続ける。
- ・ 様々な分野が等しく混じって存在しているように心がける。

拠点形成や研究開発の推進にあたっては、「計算のエネルギー効率」「深層学習の高度化」「情報熱力学の生命科学への応用」など共通目標を設定し、分野融合の動機づけをすることが重要である。このような共通目

標は先導的研究会など研究コミュニティからボトムアップに得られるのが理想的だが、分野融合初期においては分野を率いるリーダーによるトップダウンでの誘導も必要であろう。ただし、初期には目標への貢献や直接的な関係が分からない分野や研究テーマであっても、ある程度許容して進めることが肝要である。

共通の問題意識が醸成されるとともに、少し異なる分野の考え方や手法などその分野にはなかった発想が取り入れられる場合があり分野発展に貢献すると期待される。とくに、理論家と実験家の交流が本質的に重要である。本プロポーザルが提案する研究開発課題は理論が先行する面も多く、理論家だけによる新しいアイデアの多くは実験検証が難しいことにより一時の流行で終わるといった懸念がある。国際的研究センターでの理論家と実験家の交流を深め、理論のことをある程度理解できる実験家を育てることが可能となるだろう。理論が提案する新現象や新概念を実験で検証するという流れと、実験で見つかった新しい現象の理解に新しい理論が求められるという流れの双方向の交流により、理論・実験の両面が進展すると長続きする良い研究の流れができると期待される。

一つの組織に帰属意識を持った上でお互いに何をやっているかを知ると、共同研究が自発的に生まれることが期待される。また、他分野についての見識を深めた研究者は、それぞれの分野での翻訳者にもなる。やがて分野間の架け橋となり、学際領域の研究者の育成のきっかけともなりうる。異分野の言語や文化の習得により論文等の資料を読み解く障壁も劇的に下がると期待され、さらなる学際領域の研究者の数や質を高めることへの寄与が期待できる。拠点の様子を示すイメージを Stable Diffusion で作成した図を図 4-4 に示した¹。



図 4-4 Stable Diffusion で作成した「情報・物理・数理の共創」のイメージ

1 オンライン版^[157]を用いた。プロンプトには「illustration. many people and tables. researchers. small groups. there are five tables around one big tree. Researchers are discussing about their equation around each tables with coffee. smile. frank presentation. cafeteria. equation. new design. laboratory」を入力した。

コラム

拠点形成の例

東京大学生物普遍性研究機構^[158]

東京大学理学系研究科に2016年に設立された生物普遍性研究機構では、東京大学の理論的生物学と定量的生命実験科学の研究グループを結集し、世界を先導する新分野を創出することを目指している。生命現象に関する数理と物理を用いた定量的・理論的な研究を行っている研究者は、理学系、薬学系、医学系、情報理工系、工学系、総合文化研究科にまたがるが、従来はそれぞれの分野の拠点で別々に研究を進めていた。生物普遍機構では、共通の目標に向かって、異なる分野の研究者が物理的な拠点として集結している。ここでは、定期的にセミナーが開催され、他の研究室の研究を把握するとともに、今後の動向について情報共有される。また、共通の目的意識、拠点への所属意識を有することにより、分野融合のスピードが大幅に向上している。

理化学研究所数理創造プログラム (iTHEMS)^[159]

理化学研究所に設立された数理創造プログラム (Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program, 略称 iTHEMS アイテムズ) は、理論科学・数学・計算科学の研究者が分野の枠を越えて基礎研究を推進する新しい国際研究拠点である。iTHEMS では、「数理」を軸とする分野横断的手法により、宇宙・物質・生命の解明や、社会における基本問題の解決を目指している。

数学、物理学、生物学、計算科学、情報科学など異なる分野の理論研究者が一つ屋根の下に結集し、それぞれの分野のエキスパートが切磋琢磨し、新たな発展を生み出せる環境を、物理的にも精神的にも整備する。基本の旗として、4つの研究セル (極限宇宙、生命進化、数理とAI、新しい幾何学) をトップダウンで与える。これらの分野の研究者がその間を行き来し、研究者間での共同研究や、他分野の研究を自身の研究に取り入れるなど、柔軟に進められる体制となっている。また、内外の若手の提案による学際的プロジェクトであるワーキンググループや、情報共有活動であるスタディグループなどの仕組みを整えている。

研究者が一堂に会し自由に討論できる場として、毎週金曜日にコーヒーミーティングを開催している。ここで顔を合わせながら話をすることで、お互いの理解や研究内容を知ることができ、他の分野の研究に興味を広がり、分野を横断した新しい研究の芽が生まれる (図4-5)。

分野横断型研究の例として、生物学者・物理学者がセンターを超えて協力した「進化・生体ダイナミクスにおける速度限界不等式の発見」^[160, 161]、数学者・生物学者・物理学者が協力した「複雑な化学反応ネットワークを単純化する数理手法の構築」^[162, 163]などが挙げられる。

4.4 長期的視点のプロジェクト

本提言が対象とする情報学・計算機科学と物理学の融合領域の研究開発を効果的に推進するためには、その研究開発に従事する者に対し、5年程度の任期で、任期満了時点で問題がなければさらに更新が可能であり、通算して10年程度とどまれるようなポジションを用意する必要がある。以下に、そのようなポジションを必要とする理由について、2つの観点（異なる研究分野の融合領域である点、基礎的・萌芽的な研究領域である点）から記述し、最後に充当すべきプロジェクト、時間軸について触れる。

(1) 異なる研究分野の融合領域である点

まず、当該領域が情報学・計算機科学と物理学の「融合領域」である点を考慮する必要がある。情報学と計算機科学、物理学、さらに数学の研究者が共通するテーマを見つけ出し、互いの強みを活かして協力しながら研究を進められる状況が理想である。しかし、研究分野ごとに、言葉遣いから価値観、評価基準、慣習に至るまで、多くの面で異なっている。そのため、類似した対象を研究する研究者の間でさえ、最初は用語の意味が理解できず、コミュニケーションをとることすら難しい。日常的に交流できる環境を用意できたとしても、そういった研究者同士が互いの言葉を理解できるようになり、さらに共通する興味深い研究テーマを見出だすことができ、共同研究に至るようになるまでには、少なくとも2～3年程度の期間が必要になる。したがって、当該融合領域の研究に取り組む研究者が成果を創出し始めるまでに要する期間が5年程度になると推測される。そのため、そのポジションの任期としては最短で5年とし、任期満了時に更新も可能となり、通算10年程度在籍可能な長期の任期のものとしてはじめて、当該融合領域において優れた研究成果が創出される。

また、当該領域の研究成果を応用し、将来的な社会実装につなげていくことを目指すのであれば、理論研究と実験研究の「融合」という観点も欠かせない。前述の通り、当該領域は理論研究が先行している状況にある。近年、実験研究の面で著しい進展がみられるが、未だに取り組みは不十分である。例えばエネルギー効率の高いデバイス開発など、実験技術に裏付けられた応用技術の開発を行い、将来的な社会実装を目指すためには、まずは精緻な実験・計測により理論的に予測された現象を再現できるようになる必要がある。そのため、実験技術のさらなる向上と、最適な実験系の構築、の2点が欠かせない。実験技術の向上には、パズルのピースを1つずつはめていくような地道な作業が必要となることが多く、必ずしも短期間で明確な成果となって表れるものでもない。また、最適な実験系の構築には、理論研究者との意見交換を密に行った上での度重なる試行錯誤が不可欠であり、やはり短期間で構築できるものではない。したがって、そのような実験技術開発に従事する研究者・技術者にとっても5年以上の長期の任期のポジションが不可欠になる。

(2) 基礎的・萌芽的な研究領域である点

一方で、本提言が対象とする情報学・計算機科学と物理学の融合領域は、2章に記述した通り、現時点で非常に基礎的・萌芽的であり、応用展開の方向性も明確になっていない。研究者が自由な発想に基づいてキュリオシティドリブンで当該領域を開拓することで、領域の範囲を拡大し、さらに深化していくフェーズにあると言える。そのような状況において、当該領域で研究開発に従事する研究者が、数年間といった短いスパンで優れた研究成果をあげることは極めて困難である。さらに言えば、あがった成果が優れたものだったかどうかすら判断することが難しい。未だ黎明期である当該領域においては、優劣の評価基準がまだ確立されていないからである。研究者は任期内に研究成果（特に論文）をあげないと、次のポジションを獲得することができない、という事情があるため、2～3年程度の短期のポジションを用意した場合、必然的に既に優れた成果と評価された研究の延長線上にある、極めて限定された範囲の研究をすることになる。5年程度の長期の任期で、さらに更新により通算して10年程度在籍可能なポジションを用意してはじめて、そのポジションに就く

研究者に、魅力的でスケールの大きな研究開発テーマにチャレンジしてもらうことが可能になり、当該領域の持つ膨大なポテンシャルを生かすことができる。

(3) プロジェクトの構成と時間軸

以上の通り、本提言が対象とする情報学・計算機科学と物理学の融合領域の研究開発を推進するには、研究開発に従事する者に対して比較的長い任期のポジション（5年程度で、任期満了時点で問題がなければさらに更新可能）を用意することが必要である。一方で、4.2節や4.3節で記述した通り、さまざまな分野の研究者が相互に情報交換や議論ができるような「場」や、複数の領域にまたがるアイデアを日常的に議論する共通基盤となるべき「物理的拠点」を、分野融合のフェーズに合わせ、最適なタイミングで提供することも重要である。推進の流れとして、以下に一例を示す（図4-1参照）。

- (i) (0～3年後に実施) さまざまな分野の研究者が広く参画可能な分野融合型プロジェクト（研究開発期間：3年程度）を発足し、プロジェクト内の領域会議などの機会を活用して問題意識の共有や議論を促す「場」を提供することで融合研究の下地をつくる。
- (ii) (1～5年程度経過した後に実施) 融合研究の下地から、融合研究の新たな芽を育てるための「物理的拠点」形成プロジェクトを発足する。さらに、新たな芽の中で特に有望なテーマについて、融合をさらに加速するための分野融合型・大型プロジェクトを発足する。いずれにおいても、5年以上の長期プロジェクトであり、かつ出口をあらかじめ明確化しない「ボトムアップ型」の基礎的研究開発プロジェクトであることが必須条件になる。
- (iii) (応用・社会実装に適したテーマが育ってきたタイミングで実施) 育ってきた融合研究テーマの中で出口が見えてきたものがあれば、応用・社会実装を促すための「バックキャスト型」研究開発プロジェクトを発足する。テーマの内容によっては、産業界との協力・協業を推進するために、採択方針として「産学共同提案を優先的に採択」とするのも有効である。

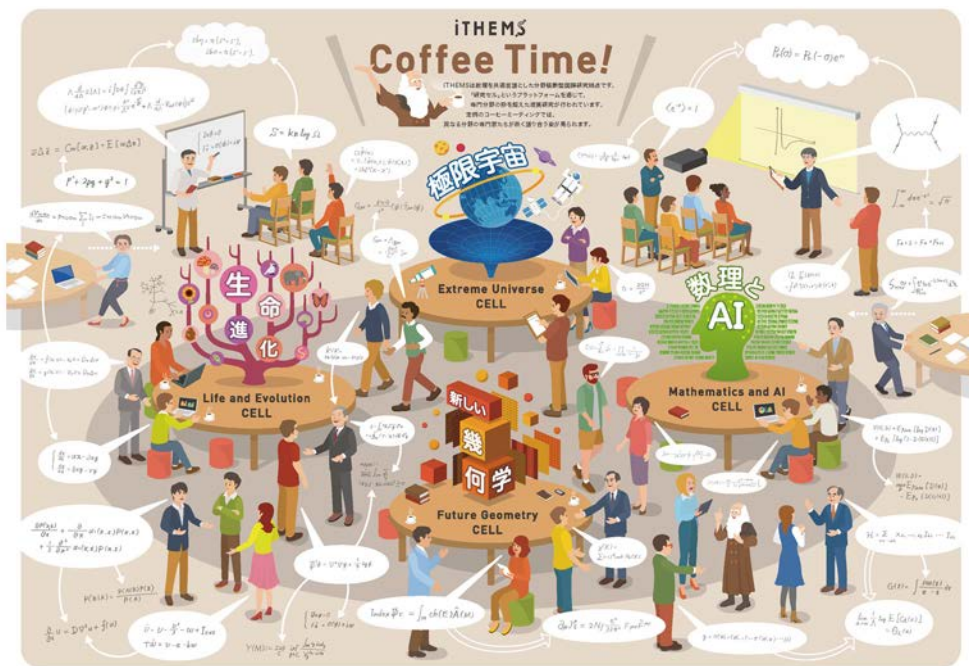


図4-5 数理創造プログラムのビジョン (© RIKEN) ^[159]

コラム

プロジェクトの具体例

分野融合のための「場」の提供を可能とするプロジェクト（前述の（i）に該当）として、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ（研究開発期間：3.5年）などがあげられる。さきがけは、若手研究者が多く参加する個人型研究のプロジェクトであるが、1領域あたりにより多くの研究提案（10件程度/年度×3年間採択）が採択される。その領域会議（各年度ごとに2回程度の開催）には、全ての研究代表者に加え、領域統括を含む領域アドバイザーが一堂に会する。研究者間の交流を促進し、分野融合を加速すると同時に、想定外の組み合わせによる新たな融合研究を生むインキュベーターとしてふさわしい。

融合研究の新たな芽を育てる「物理的拠点」形成プロジェクト（上記（ii）に該当）としては、世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）（研究開発期間：10年）がある。WPIは「世界から目に見える研究拠点」を形成し、日本の科学技術水準を維持・向上させていくことを目指す基礎研究プロジェクトである。取り組みの方向性として「分野融合性と多様性による学問の最先端の開拓」を謳っており、本提言が目指す「情報学・計算機科学と物理学の分野融合」にまさに合致する。

一方、特に有望なテーマについて、融合をさらに加速するための分野融合型・大型プロジェクト（前述の（iii）に該当）として、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST（研究開発期間：5.5年）を充当することが可能であろう。CRESTの予算規模は総額1.5億～5億円程度/チームと比較的大きく、実験研究も十分にサポート可能である。またCRESTでは、分野融合の「場」に相当する領域会議が各年度ごとに2回程度設けられる。CRESTの場合、1領域あたり15程度の研究開発チーム（5チーム程度/年度×3年間採択）が採択されるが、その領域会議では、さきがけと同様に、研究開発チームのメンバーおよび領域統括を含む領域アドバイザーが一堂に会する。したがって、分野融合をさらに加速する「場」の提供もできる。さきがけを先行して発足させ、数年遅らせてCRESTを立ち上げる2段階方式の例として、CREST・さきがけ複合領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」（さきがけ発足：2007年度、CREST発足：2008年度）がある。

育ってきた融合研究テーマの応用化・社会実装のための「バックキャスト型」研究開発プロジェクト（前述の（iii）に該当）としては、JST 共創の場形成支援プログラム（COI-NEXT）（研究開発期間：10年）のような長期・拠点型での推進が適しているだろう。COI-NEXTは、未来のありたい社会像を拠点ビジョンとして掲げ、その達成に向けたバックキャストによるイノベーションに資する研究開発を行うための、産学官共創拠点の形成を目的とする目的志向型プロジェクトである。例えばCRESTやWPIなどで分野融合を進め、応用先が明確になってきた時点でCOI-NEXTに展開するのが効果的であろう。

付録A 検討の経緯

研究開発戦略センター（CRDS）では、2022年度の戦略スコープ策定委員会において、本テーマを戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補に選定し検討チームを発足させた。検討チームは2022年4月から活動を開始、1年間余りにわたって検討を進めてきた。その間、以下のようなインタビューやワークショップにより、研究開発状況の把握や研究課題・方向性の議論を深めてきた。

A.1 インタビュー

本プロポーザル作成にあたり、表A-1のとおり有識者に研究内容や推進体制、国内外動向についてインタビューを実施した（実施日時順、敬称略、所属・役職は実施当時）。

表A-1 実施インタビュー

実施日	氏名	所属・役職
6/20 (月)	上田 正仁	東京大学大学院理学系研究科教授
6/21 (火)	坂内 健一	慶應義塾大学理工学部数理科学科教授
6/27 (月)	初田 哲男	理化学研究所数理創造プログラム プログラムディレクター
6/27 (月)	藤井 啓祐	大阪大学大学院基礎工学研究科教授
7/1 (金)	藤原 聡	NTT 物性科学基礎研究所 上席特別研究員
7/6 (水)	押川 正毅	東京大学物性研究所 教授
7/7 (木)	沙川 貴大	東京大学大学院工学系研究科教授
7/8 (金)	鳥谷部 祥一	東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻教授
7/8 (金)	宮崎 弘安	NTTコミュニケーション科学基礎研究所 研究主任
7/11 (月)	白石 直人	東京大学大学院総合文化研究科准教授
7/12 (火)	河東 泰之	東京大学大学院数理科学研究科教授
7/15 (金)	佐々田 槇子	東京大学大学院数理科学研究科准教授
7/15 (金)	岡田 康志	東京大学理学系研究科物理学専攻教授
7/20 (水)	田中 章詞	理化学研究所革新知能統合研究センター (AIP) 上級研究員
7/21 (木)	田島 裕康	電気通信大学大学院情報理工学研究科助教
7/22 (金)	佐藤 正寛	千葉大学大学院理学研究院教授
7/22 (金)	濱崎 立資	理化学研究所開拓研究本部 理研白眉チームリーダー
8/30 (火)	齊藤 圭司	慶應義塾大学理工学部物理学科教授
11/9 (水)	吉田 紅	ペリメーター理論物理学研究所 教員
11/10 (木)	伊藤 創祐	東京大学大学院理学系研究科附属生物普遍性研究機構 講師
12/5 (月)	高柳 匡	京都大学基礎物理学研究所 教授
12/12 (月)	宇賀神 知紀	京都大学白眉センター 特定助教
12/14 (水)	甘利 俊一	帝京大学先端総合研究機構 特任教授
2/13 (月)	永長 直人	理化学研究所創発物性科学研究センターグループディレクター

A.2 科学技術未来戦略ワークショップ「情報と計算の物理と数理」

本プロポーザル作成にあたり、下記の通り、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。詳細についてはワークショップ報告書^[164]を参考されたい。

概要

日時：2022年12月20日（火）8：30～12：00

場所：オンライン（zoom）

主催：国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター（CRDS）

招聘有識者

伊藤 創祐	東京大学大学院理学系研究科講師
宇賀神 知紀	京都大学白眉センター特定助教
宇都宮 聖子	AWS ジャパン株式会社機械学習ソリューションアーキテクト
河東 泰之	東京大学大学院数理科学研究科教授
沙川 貴大	東京大学大学院工学系研究科教授
鮫島 昌弘	ANRI ジェネラル・パートナー
田中 章詞	理化学研究所革新知能統合研究センター（AIP）上級研究員
初田 哲男	理化学研究所数理創造プログラム（iTHEMS）プログラムディレクター
坂内 健一	慶應義塾大学理工学部数理科学科教授
吉田 紅	ペリメーター理論物理学研究所教員

プログラム

8：30～8：40	趣旨説明・参加者紹介
8：40～10：00	セッション1「物理と情報」
8：40～9：00	「量子情報・量子物性これまでとこれから」吉田紅（ペリメーター理論物理学研究所）
9：00～9：20	「情報熱力学とその周辺」沙川貴大（東京大学）
9：20～9：40	「省エネルギー性の物理と最適輸送・情報幾何の数理」伊藤創祐（東京大学）
9：40～10：00	「AWSにおける量子コンピューティング技術国際・産学連携」 宇都宮聖子（AWS ジャパン株式会社）
10：00～10：15	総合討論1
	（休憩）
10：20～11：40	セッション2「数理と情報」
10：20～10：40	「深層生成モデルの発展について」田中章詞（理化学研究所）
10：40～11：00	「分野連携と拠点形成 - 理研数理創造プログラム（iTHEMS）の取り組みを例に -」 初田哲男（理化学研究所）
11：00～11：20	「プロジェクト・人材育成について」河東泰之（東京大学）
11：20～11：40	「情報と数理」坂内健一（慶應義塾大学）
11：40～11：55	総合討論2
11：55～12：00	ラップアップ

付録B 専門用語説明

AdS/CFT 対応

反ドジッター宇宙に対するホログラフィー原理。反ドジッター宇宙 (AdS) の重力理論は、その端に存在する共形場理論 (CFT: Conformal Field Theory) と同一の理論となるという対応関係を表す。反ドジッター宇宙を円板とすると、円板の外周に共形場理論が位置することになる。ドジッター宇宙 (dS) に対するホログラフィー原理「dS/CFT 対応」の研究も進められており、ここではドジッター宇宙 (dS) の重力理論は無限の未来に位置する共形場理論 (CFT) に対応づけられる。

エントロピー生成

エントロピー生成とは、系の不可逆性の度合いを表す物理的な量である。外界である浴とエネルギーや物質をやり取りする系において、エントロピー生成は系そのもののエントロピーの変化と浴のエントロピーの変化を全て足し上げたものであり、この値が常に非負であることがエントロピー増大則として熱力学第二法則の一つの表現として知られている。エントロピー生成は「熱力学的力 (化学ポテンシャル差、温度差、圧力差、電圧差などに起因する駆動力)」と「熱力学流れ (物質、熱、流体、電気などの流れ)」の積でも表され、状態が変化する際には熱力学的力に駆動されて熱力学流れが生じることから、必ずエントロピー生成が生じる。

カルバック・ライブラー情報量

二つの確率分布がどれだけ異なるかを測る情報理論的な量。「カルバック・ライブラー距離」と呼ばれる場合もあるが、距離の公理は満たさないため「距離のようなもの」という方が正しい。確率分布 p と q とのカルバック・ライブラー情報量とは、 p を q で近似したときにどのくらい情報が失われるかを表す量とも解釈できる。

機械学習

データの背後に潜む規則性や特異性を発見することにより、人間と同程度あるいはそれ以上の学習能力をコンピューターで実現しようとする技術。教師あり学習、教師なし学習、強化学習といったタイプがあり、さまざまな方式 (深層学習、サポートベクトルマシン、決定木、回帰分析、ベイジアンネットワークなど) が開発されている。

共形場理論

空間の角度を変えない共形変換で不変となる場の量子論を共形場理論と呼ぶ。共形場理論は拡大縮小しても変わらないというスケール対称性を持ち、系の臨界点近傍のダイナミクスを記述する理論として物性物理学を中心に広く知られている。素粒子物理学では弦理論の数学的な基礎づけを与える理論としても知られ、ゲージ理論と重力理論の双対性の研究でも重要な役割を果たす。

固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH)

孤立量子系が時間発展により熱力学的平衡状態に緩和すること (熱平衡化) を説明する機構。いくつかの量子系では物理量の期待値が平衡統計力学でのミクロカノニカル平均に緩和することが数値計算により確かめられている。ETH には「強いETH」と「弱いETH」があり、全ての固有状態は熱的な性質を持つということを主張する「強いETH」が成立すると全ての固有状態で物理量の期待値はミクロカノニカル平均と一致する (系は熱平衡化する)。一方で、熱平衡化しない量子系も知られている。「弱いETH」が成立する場合

には指数関数的に少ない状態だけが熱平衡化せず、ほとんど全ての固有状態は熱的な性質を持つことを主張する。

仕事

熱力学において、対象とする系と外部との間でやりとりされる力学的なエネルギー。系と外部との間でやりとりされる熱と仕事についてのエネルギー保存則が熱力学第一法則である。

シャノン・エントロピー

情報理論において、ある事象がどの程度の情報を持つのかを測る尺度。その事象がどれほど起こりにくいかを表す尺度ともみなせる。「シャノン情報量」「情報エントロピー」などとも呼ばれる。ありふれた事象にはあまり多くの情報は含まれていないが、珍しい事象にはより多くの「情報」が含まれているとする考え方を反映している。このときの「情報」とは、あくまでその事象の発生確率のみによって決まる量であり、個人や社会における情報の有用性や価値とは無関係である。例えば、「私が宝くじに当たる」と「誰か別の人が宝くじに当たる」は、前者の方が価値ある情報に感じるが、シャノン・エントロピーで測った情報量は同じである。

情報幾何学

確率分布の集合からなる空間を考えて、その空間の中に成り立つ幾何学を考える数学の分野。統計学、機械学習、情報理論など確率分布が主要な役割を果たす分野において用いられ、幾何学的な直観的な理解と新しい方法論を提供している。

情報熱機関

熱を仕事やエネルギーに変換する機関を「熱機関」と呼ぶことになぞらえて、フィードバック機構などにより情報を仕事やエネルギーに変換する熱機関を「情報熱機関」と呼ぶ。「マクスウェルのデーモン」をモデル化するシラード・エンジンは効率100%の情報熱機関だと知られ、平衡熱力学における効率上限を達成する熱機関であるカルノー・サイクルの情報熱力学版とも言える基本的な熱機関である。

深層学習

多層ニューラルネットワークを用いた機械学習方式である。特徴量空間上での識別境界だけでなく、特徴量そのものも学習できる点が革新的で、画像認識・音声認識等の分野で従来方式を大きく凌駕する性能を示して注目を浴びた。さらに、アクション結果に対する報酬から、より大きな報酬を得る方策を学習する強化学習に深層学習を組み合わせた深層強化学習を用いた「AlphaGo」は、人間のプロ囲碁棋士を破って大きな話題となった。

生成モデル

観測されたデータを生成するような確率分布を想定し、観測データからその確率分布を推定する手法の総称。深層ニューラルネットワークを生成モデルとして学習し、画像、音声、テキストなどを作成する生成モデルは「深層生成モデル」と呼ばれる。変分オートエンコーダー（VAE）、敵対的生成ネットワーク（GAN）、自己回帰モデル、フロー正規化モデル、など様々構造のモデルが提案されている。

相互情報量

確率論および情報理論において、2つの確率変数の相互依存の尺度を表す量である。最も典型的な相互情報量の物理単位はビットであり、2を底とする対数が使われることが多い。

テンソルネットワーク

大きなテンソルを網の目のように接続した小さな多数のテンソルからなるテンソル積の縮約として表現したもの。統計力学で扱う分配関数や量子力学や場の理論での演算子の期待値、量子多体系の波動関数などを表現するのに用いられる。テンソルネットワークは計算の効率化のためだけでなく、トポロジカル量子相の特徴づけにも有用だと知られており、量子化学計算や機械学習など様々な分野への応用も期待されている。

トポロジカル相

秩序パラメータで特徴づけられる従来の相とは異なり、秩序パラメータを持たず系の大域的なトポロジーによって記述される相。とくに、物質中の電子の波動関数の位相がもつ幾何学的構造で定義されるトポロジカル不変量で特徴づけられる電子相をトポロジカル量子相と呼ぶ。代表的なトポロジカル相として量子ホール系やトポロジカル超伝導体などが挙げられる。

熱力学的不確定性関係

熱や仕事（エントロピー生成）と熱力学的な観測量の揺らぎの間にある「熱力学的な状態間の遷移のスピードや精度を上げるためには十分な熱力学的コストが必要」などのトレードオフ関係は、量子力学の不確定性関係になぞらえて「熱力学的不確定性関係」と呼ばれる。

非平衡統計力学

統計力学は系のミクロな物理法則を元にしてマクロな性質を導き出す。マクロに見て時間変化しない熱平衡状態についての統計力学は確立されているが、平衡から離れた非平衡状態の統計力学は未完成とされている。統計力学から熱力学が導出されると表現されることもあるが、「統計力学が熱力学を基礎づけるのではない。熱力学との整合性こそが、統計力学を基礎づけるのである」という言葉もある^[165]。

フィッシャー情報量

観測値から分布のパラメータを最尤法で推定する際に、観測する確率変数 X がパラメータ θ に関して持つ情報量。パラメータが θ である母集団の従う分布の確率密度関数 $f(X_i | \theta)$ をとるとき、対数尤度関数 $\log f(X_i | \theta)$ を θ で2階微分したものの期待値がフィッシャー情報量である。

ボルツマン・マシン

ジェフリー・ヒントンとテリー・セジュノスキーによって開発された確率的回帰結合型ニューラルネットワークの一種。外部磁場のある確率的スピングラスモデルと見なすこともできる。サンプリング関数に統計力学のボルツマン分布が使われることにちなんでこの名がつけられている。一般的なボルツマン・マシンの学習は非実用的だが、同一層間の接続を認めない「制限ボルツマン・マシン」ではコントラストティブ・ダイバージェンス法という効率的な方法が知られている。

ホログラフィ原理

ある宇宙の重力理論がその宇宙の端に仮想的に存在すると考えられる量子物質を表す理論（共形場の理論）と同一であるとする原理。対応する2つの理論を比べると、重力理論のほうが共形場の理論より1次元高い時空となっており、平面から立体像が浮かび上がるホログラムに似ていることから「ホログラフィ原理」と呼ばれる。反ドジッター宇宙のホログラフィ原理（AdS/CFT 対応）は様々な形で検証が進められてきているが、より一般の宇宙に対するホログラフィ原理は未解明の部分が多い。

マクスウェルのデーモン

1867年にマクスウェルが提唱した思考実験。箱の中に入っている多数の気体分子の速度を測定し、それに応じて分子を選び分ける「デーモン（悪魔）」がいれば、箱の中の気体のエントロピーを減らし熱力学第二法則を破ることができるように見える（第二種永久機関）。パラドックスとして長い間多くの物理学者たちの間で議論されてきたが理解は不完全であった。近年の研究によって、情報量の概念を導入することで、このようなデーモンと熱力学第二法則とを矛盾なく説明できることがわかった。

ゆらぎの定理

水中のブラウン粒子などのミクロな系は、同じ条件下での実験でも試行ごとに異なる軌跡をたどる。このようなミクロな系でのゆらぎを詳細に特徴付ける関係式が「ゆらぎの定理」である。ゆらぎの定理から熱力学第二法則や非平衡状態についての多くの重要な熱力学法則を導出できるため、ゆらぎの定理はミクロな系の非平衡熱力学で最も重要な関係式である。

ランダウア原理

情報の消去など論理的に非可逆な操作は熱力学的にも非可逆であり、相応する熱力学的エントロピーの増加が必要であることを主張する原理。情報処理において1ビットの情報を失うとき、環境での熱力学的エントロピーの上昇は少なくとも1ビットであり、環境に放出される熱は最低でも $k_B T \log 2$ と計算される（ k_B はボルツマン定数、 T は温度）。この限界値はランダウア限界と呼ばれる。

量子シミュレーション

現実の物質における量子状態を表すモデルを実験パラメータが制御可能な別の量子系にマップし、実験的に振る舞いを調べることを量子シミュレーションという。ある種のアナログ計算であり、風洞実験の量子力学版とも言える。イジングモデルやハバードモデルなどの量子多体系を表すモデルを冷却原子系で実現し、様々な量子現象の量子シミュレーションが研究されている。

量子多体系

量子力学に従う多数の自由度が互いに相互作用しあう物理系。磁性や超伝導などの物性は多数の電子（がもつ自由度）の相互作用から創発する量子多体系象だといえる。各自由度の運動は多体の波動関数によって記述されるが、量子多体系の自由度が増えるとハミルトニアン次元が指数関数的に増大し、その固有状態も指数関数的に大きなサイズのベクトルになるため、基本的には解析的な厳密解は得られない。人工的な量子多体系である量子シミュレータによる実験的アプローチの研究も進められている。

量子もつれ（エンタングルメント）

量子系に現れる古典物理学では説明できない量子力学に特有の相関。構成する個々の部分系の積として表せない複合系の状態を量子もつれ状態と呼ぶ。量子もつれは量子通信や量子計算に本質的に必要な要素とされる。エンタングルメント・エントロピーによって量子もつれの強さを測ることができる。

ワッサースタイン距離

確率分布の間の距離のひとつ。直感的には、それぞれの分布を堆積した土の山と見なすとき、一つの山を別の山へと移すときにかかる最小のコストがワッサースタイン距離である（このときのコストは、移されるべき土の量と移す距離を掛けた値）。ワッサースタイン距離は、確率分布を比較するツールとしての最適輸送の特殊ケースとも見なせることから、カルバック・ライブラー情報量に代わる損失関数として、機械学習での応用が試行されている。

参考文献

- [1] R. Landauer. Information is physical. *Physics Today*, Vol. 44, No. 5, p. 23, 1991.
- [2] T. Dittrich. The concept of information in physics: an interdisciplinary topical lecture. *European Journal of Physics*, Vol. 36, p. 015010, 2014.
- [3] D. Monroe. Information Is Physics. *Communications of the ACM*, Vol. 62, pp. 13-15, 2019.
- [4] T. Hylton, et al. A Vision to Compute like Nature: Thermodynamically. *Communications of the ACM*, Vol. 64, No. 6, pp. 35-38, 2021.
- [5] Simons Foundation. It from Qubit: Simons Collaboration on Quantum Fields, Gravity and Information. <https://www.simonsfoundation.org/mathematics-physical-sciences/it-from-qubit/>.
- [6] 高柳匡. 量子エンタングルメントから創発する宇宙. 共立出版, 2020.
- [7] S. Toyabe, et al. Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality. *Nature Physics*, Vol. 6, pp. 988-992, 2010.
- [8] K. Chida, et al. Power generator driven by Maxwell's demon. *Nature Communications*, Vol. 8, p. 15310, 2017.
- [9] J. V. Koski, et al. On-Chip Maxwell's Demon as an Information-Powered Refrigerator. *Physical Review Letters*, Vol. 115, p. 260602, 2015.
- [10] R. Islam, et al. Measuring entanglement entropy through the interference of quantum many-body twins. *Nature*, Vol. 528, pp. 77-83, 2015.
- [11] T. Brydges, et al. Probing Rényi entanglement entropy via randomized measurements. *Science*, Vol. 364, No. 6437, pp. 260-263, 2019.
- [12] K. A. Landsman, et al. Verified quantum information scrambling. *Nature*, Vol. 567, pp. 61-65, 2019.
- [13] 西森秀稔. スピングラス理論と情報統計力学. 岩波書店, 2016.
- [14] 田中章詞, 富谷昭夫, 橋本幸士. ディープラーニングと物理学: 原理がわかる、応用ができる. 講談社, 2019.
- [15] 大関真之. 機械学習における物理が果たす役割—量子機械学習とその現状. 日本物理学会誌, Vol. 76, No. 4, pp. 194-201, 2021.
- [16] 吉野元. 深層ニューラルネットワークの解剖—統計力学によるアプローチ. 日本物理学会誌, Vol. 76, No. 9, pp. 589-594, 2021.
- [17] T. Sagawa. Thermodynamics of information processing in small systems. *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 127, No. 1, pp. 1-56, 2012.
- [18] 沙川貴大. 非平衡統計力学—ゆらぎの熱力学から情報熱力学まで—. 共立出版, 2022.
- [19] 藤原彰夫. 情報幾何学の基礎. 牧野書店, 2015.
- [20] 甘利俊一. 情報幾何学の新展開. サイエンス社, 2019.
- [21] 伊藤創祐. 物理学と情報幾何学—ゆらぎ系の熱力学の視点から. 数理科学, Vol. 58-11, No. 689, pp. 38-45, 2020.
- [22] 長岡浩司. 量子力学と情報理論—相対エントロピー, 統計力学, sanov の定理をめぐる—. 数理科学, Vol. 56-6, No. 660, pp. 7-14, 2018.
- [23] M. A. Nielsen and I. L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*.

- Cambridge University Press, tenth anniversary edition, 2011.
- [24] ミカエルニールセン, アイザックチャン (著), 木村達也 (訳). 量子コンピュータと量子通信. オーム社, 2004.
- [25] 石坂智, 小川朋宏, 河内亮周, 木村元, 林正人. 量子情報科学入門. 共立出版, 2012.
- [26] 松枝宏明. 量子系のエンタングルメントと幾何学: ホログラフィー原理に基づく異分野横断の数理. 森北出版, 2016.
- [27] Bei Zeng, Xie Chen, Duan-Lu Zhou, and Xiao-Gang Wen. *Quantum Information Meets Quantum Matter: From Quantum Entanglement to Topological Phases of Many-Body Systems*. Springer New York, 2019.
- [28] 押川正毅. 量子情報と統計力学. 数理科学, Vol. 56-6, No. 660, pp. 23-29, 2018.
- [29] 西野友年. テンソルネットワークの基礎と応用統計物理・量子情報・機械学習. サイエンス社, 2021.
- [30] 大栗博司. 量子情報理論の量子重力への応用. 数理科学, Vol. 56-6, No. 660, pp. 46-53, 2018.
- [31] C. Jarzynski. Nonequilibrium Equality for Free Energy Differences. *Physical Review Letters*, Vol. 78, p. 2690, 1997.
- [32] G. E. Crooks. Entropy production fluctuation theorem and the nonequilibrium work relation for free energy differences. *Physical Review E*, Vol. 60, p. 2721, 1999.
- [33] C. Jarzynski. Equalities and inequalities: irreversibility and the second law of thermodynamics at the nanoscale. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, Vol. 2, pp. 329-51, 2011.
- [34] 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 戦略プロポーザル「革新的コンピューティング～計算ドメイン志向による基盤技術の創出～」. No. CRDS-FY2017-SP-02, 2018.
- [35] T. M. Conte, et al. Rebooting Computing: The Road Ahead. *Computer*, Vol. 50, pp. 20-29, 2017.
- [36] N. Jones. How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*, Vol. 561, p.163, 2018.
- [37] 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 調査報告書「デジタル化とエネルギー～ICT セクターの持続可能な成長のために～」. No. CRDS-FY2021-RR-03, 2021.
- [38] IEEE. Rebooting Computing. <https://rebootingcomputing.ieee.org/>.
- [39] J. L. Hennessy and D. A. Patterson. *Computer architecture: a quantitative approach*, chapter Domain Specific Architectures. Elsevier, sixth edition, 2018.
- [40] J. L. Hennessy and D. A. Patterson. A New Golden Age for *Computer Architecture*. *Communications of the ACM*, Vol. 62, pp. 48-60, 2019.
- [41] 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 戦略プロポーザル「みんなの量子コンピューター～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～」. No. CRDS-FY2018-SP-04, 2018.
- [42] K. Rupp. Microprocessor Trend Data. <https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data>.
- [43] 岡本健太郎 (著), 松江要 (著), 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター (JST/CRDS) (編集), 高島洋典 (編集), 吉脇理雄 (編集). 社会に最先端の数学が求められるワケ (1) - 新しい数学と産業の協奏. 日本評論社, 2022.
- [44] 杉山真吾 (著), 横山俊一 (著), 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター (JST/CRDS) (編集), 高島洋典 (編集), 吉脇理雄 (編集). 社会に最先端の数学が求められるワケ (2) - データ分析と数学の可能性. 日本評論社, 2022.
- [45] 理数系人材の産業界での活躍に向けた意見交換会. 数理資本主義の時代～数学パワーが世界

を変える～ (2019年3月26日) . https://www.meti.go.jp/shingikai/economy/risukei_jinzai20190326_report.html.

- [46] Computing Community Consortium (CCC). Thermodynamic Computing. <https://cra.org/ccc/events/thermodynamic-computing/>.
- [47] The American Physical Society (APS). Topical Group on Statistical & Nonlinear Physics. <https://engage.aps.org/gsnap/home>.
- [48] 28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28. <https://statphys28.org/>.
- [49] The Third Workshop on Stochastic Thermodynamics (WOST III). http://noneq.c.u-tokyo.ac.jp/Stochastic_Thermodynamics_III/meeting-information/.
- [50] 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」. <https://infophys-bio.jp/>.
- [51] Machine Learning and the Physical Sciences, Workshop at the 36th conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022). <https://ml4physicalsciences.github.io/2022/>.
- [52] Optimal Transport and Machine Learning, Workshop at the 35th conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021). <https://otml2021.github.io/>.
- [53] 学術変革領域研究 (A)「学習物理学の創成－機械学習と物理学の融合新領域による基礎物理学の変革」. <https://mlphys.scphys.kyoto-u.ac.jp/>.
- [54] The American Physical Society (APS). Division of Quantum Information. <https://engage.aps.org/dqi/home>.
- [55] Conference on Quantum Information Processing (QIP). <https://qipconference.org/>.
- [56] 学術変革領域研究 (A)「極限宇宙の物理法則を創る－量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」. <https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/>.
- [57] IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). <https://qce.quantum.ieee.org/2023>.
- [58] 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ. 量子情報技術特別研究専門委員会. <https://www.ieice.org/es/qit/>.
- [59] 情報処理学会. 量子ソフトウェア研究会. <https://sigqs.ipsj.or.jp/>.
- [60] JST. さきがけ「物質と情報の量子協奏」. https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/bunya2022-1.html.
- [61] APS. Unit Statistics. <https://www.aps.org/membership/units/statistics.cfm>.
- [62] Green 500. <https://www.top500.org/lists/green500/>.
- [63] Noam Nisan (著), Shimon Schocken (著), 斎藤康毅 (訳). コンピュータシステムの理論と実装 - モダンなコンピュータの作り方. オライリー・ジャパン, 2015.
- [64] 総務省. 情報通信白書 (令和4年度版) . <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>.
- [65] OpenAI. AI and Compute. <https://openai.com/blog/ai-and-compute/>.
- [66] Electronic Design. Energy Efficiency of Computing: What's Next? <https://www.electronicdesign.com/microprocessors/energy-efficiency-computing-what-s-next>.
- [67] 福島孝治. モンテカルロ法の基礎と応用 - 計算物理学からデータ駆動科学へ -. 物性研究, Vol. 7, No. 2, p. 072214, 2018.
- [68] 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 戦略プロポーザル「機能解明を目指す実環境下動的計測の革新～次世代オペランド計測～」. No. CRDS-FY20-SP-07, 2021.
- [69] S. Ito and T. Sagawa. Maxwell's demon in biochemical signal transduction with feedback

- loop. *Nature Communications*, Vol. 6, p. 7498, 2015.
- [70] M. Ribezzi-Crivellari and F. Ritort. Large work extraction and the Landauer limit in a continuous Maxwell demon. *Nature Physics*, Vol. 15, pp. 660-664, 2019.
- [71] S. Still, et al. Thermodynamics of Prediction. *Physical Review Letters*, Vol. 109, p. 120604, 2012.
- [72] J. M. Parrondo, et al. Thermodynamics of information. *Nature Physics*, Vol. 11, No. 2, pp. 131-139, 2015.
- [73] S. Deffner and C. Jarzynski. Information Processing and the Second Law of Thermodynamics: An Inclusive, Hamiltonian Approach. *Physical Review X*, Vol. 3, p. 041003, 2013.
- [74] B. Boyd, et al. Thermodynamics of Modularity: Structural Costs Beyond the Landauer Bound. *Physical Review X*, Vol. 8, p. 031036, 2018.
- [75] A. B. Boyd, et al. Correlation-powered information engines and the thermodynamics of self-correction. *Physical Review E*, Vol. 95, p. 012152, 2017.
- [76] C. Aghamohammadi and J. P. Crutchfield. Minimum memory for generating rare events. *Physical Review E*, Vol. 95, p. 032101, 2017.
- [77] N. Shiraishi, et al. Universal Trade-Off Relation between Power and Efficiency for Heat Engines. *Physical Review Letters*, Vol. 117, p. 190601, 2016.
- [78] N. Shiraishi and K. Saito. Fundamental relation between entropy production and heat current. *Journal of Statistical Physics*, Vol. 174, p. 433, 2019.
- [79] N. Shiraishi, et al. Speed Limit for Classical Stochastic Processes. *Physical Review Letters*, Vol. 121, p. 070601, 2018.
- [80] S. Ito and A. Dechant. Stochastic time evolution, information geometry, and the Cramér-Rao bound. *Physical Review X*, Vol. 10, p. 021056, 2020.
- [81] M. Nakazato and S. Ito. Geometrical aspects of entropy production in stochastic thermodynamics based on Wasserstein distance. *Physical Review Research*, Vol. 3, p. 043093, 2021.
- [82] T. Van Vu and K. Saito. Thermodynamic Unification of Optimal Transport: Thermodynamic Uncertainty Relation, Minimum Dissipation, and Thermodynamic Speed Limits. *Physical Review Letters*, Vol. 13, p. 011013, 2023.
- [83] T. Yada, et al. Quantum Fluctuation Theorem under Quantum Jumps with Continuous Measurement and Feedback. *Physical Review Letters*, Vol. 128, p. 170601, 2022.
- [84] S. Deffner and S. Campbell. Quantum speed limits: from Heisenberg's uncertainty principle to optimal quantum control. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, Vol. 50, p. 453001, 2017.
- [85] L. P. García-Pintos, et al. Unifying Quantum and Classical Speed Limits on Observables. *Physical Review X*, Vol. 12, p. 011038, 2022.
- [86] Z. Gong and R. Hamazaki. Bounds in nonequilibrium quantum dynamics. *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 36, No. 31, p. 2230007, 2022.
- [87] A. Bérut, et al. Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. *Nature*, Vol. 483, pp. 187-189, 2012.
- [88] J. V. Koski, et al. Experimental realization of a Szilard engine with a single electron. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 111, No. 38, pp. 13786-13789, 2014.
- [89] Y. Jun, et al. High-Precision Test of Landauer's Principle in a Feedback Trap. *Physical Review*

Letters, Vol. 113, p. 190601, 2014.

- [90] A. Dechant, et al. All-Optical Nanomechanical Heat Engine. *Physical Review Letters*, Vol. 114, p. 183602, 2015.
- [91] J. Rossnagel, et al. A single-atom heat engine. *Science*, Vol. 352, No. 6283, pp. 325-329, 2016.
- [92] Y. LeCun, et al. Deep learning. *Nature*, Vol. 521, pp. 436-444, 2015.
- [93] C. Zhang, et al. Understanding deep learning (still) requires rethinking generalization. *Communications of the ACM*, Vol. 64, No. 3, pp. 107-115, 2021.
- [94] Y. Bahri, et al. Statistical Mechanics of Deep Learning. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, Vol. 11, pp. 501-528, 2020.
- [95] D. Zou and Q. Gu. An Improved Analysis of Training Over-parameterized Deep Neural Networks. *NeurIPS'19: Proceedings of the 33rd International Conference on Neural Information Processing Systems*, No. 184, pp. 2055-2064, 2019.
- [96] S. Spigler, et al. A jamming transition from under- to over-parametrization affects generalization in deep learning. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, Vol. 52, p. 474001, 2019.
- [97] Y. Du and I. Mordatch. Implicit Generation and Generalization in Energy-Based Models. arXiv: 1903.08689, 2019.
- [98] R. Liao, et al. Gaussian-Bernoulli RBMs Without Tears. arXiv: 2210.10318, 2022.
- [99] Marc Mezard and Andrea Montanari. *Information, Physics, and Computation*. Oxford University Press, 2009.
- [100] J. Sohl-Dickstein, et al. Deep Unsupervised Learning using Nonequilibrium Thermodynamics. arXiv: 1503.03585, 2015.
- [101] J. Sohl-Dickstein, et al. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models. arXiv: 2112.10752, 2022.
- [102] Stability-AI. Stable Diffusion. <https://github.com/Stability-AI/stablediffusion>.
- [103] H. Tajima and K. Funo. Superconducting-like Heat Current: Effective Cancellation of Current-Dissipation Trade-Off by Quantum Coherence. *Physical Review Letters*, Vol. 127, p. 190604, 2021.
- [104] 田島裕康, 布能謙. 量子コヒーレンスによる流速・散逸のトレードオフの実効的無効化. 日本物理学会誌, Vol. 77, No. 9, pp. 621-626, 2022.
- [105] R. Horodecki, et al. Quantum entanglement. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 81, pp. 865-942, 2009.
- [106] B. Coecke, et al. A mathematical theory of resources. *Information and Computation*, Vol. 250, pp. 59-86, 2016.
- [107] E. Chitambar and G. Gour. Quantum resource theories. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 91, p. 025001, 2019.
- [108] G. Gour, et al. The resource theory of informational nonequilibrium in thermodynamics. *Physics Reports*, Vol. 583, pp. 1-58, 2015.
- [109] F. Brandão, et al. The second laws of quantum thermodynamics. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 112, No. 11, pp. 3275-3279, 2015.
- [110] L. Masanes and J. Oppenheim. A general derivation and quantification of the third law of thermodynamics. *Nature Communications*, Vol. 8, p. 14538, 2017.

- [111] C. Sparaciari, et al. The first law of general quantum resource theories. *Quantum*, Vol. 4, p. 259, 2020.
- [112] I. Marvian. Coherence distillation machines are impossible in quantum thermodynamics. *Nature Communications*, Vol. 11, p. 25, 2020.
- [113] M. Lostaglio and M. P. Müller. Coherence and Asymmetry Cannot be Broadcast. *Physical Review Letters*, Vol. 123, p. 020403, 2019.
- [114] I. Marvian and R. W. Spekkens. No-Broadcasting Theorem for Quantum Asymmetry and Coherence and a Trade-off Relation for Approximate Broadcasting. *Physical Review Letters*, Vol. 123, p. 020404, 2019.
- [115] J. Åberg. Catalytic Coherence. *Physical Review Letters*, Vol. 113, p. 150402, 2014.
- [116] R. Takagi and N. Shiraishi. Correlation in Catalysts Enables Arbitrary Manipulation of Quantum Coherence. *Physical Review Letters*, Vol. 128, p. 240501, 2022.
- [117] H. Tajima, et al. Uncertainty Relations in Implementation of Unitary Operations. *Physical Review Letters*, Vol. 121, p. 110403, 2018.
- [118] P. Faist, et al. Continuous Symmetries and Approximate Quantum Error Correction. *Physical Review X*, Vol. 10, p. 041018, 2020.
- [119] H. Tajima and K. Saito. Universal limitation of quantum information recovery: symmetry versus coherence. arXiv: 2103.01876, 2021.
- [120] H. Tajima, et al. Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility, and quantum co-herence in quantum processes. arXiv: 2206.11086, 2022.
- [121] T. N. Ikeda, et al. The second law of thermodynamics under unitary evolution and external operations. *Annals of Physics*, Vol. 354, pp. 338-352, 2015.
- [122] E. Iyoda, et al. Fluctuation Theorem for Many-Body Pure Quantum States. *Physical Review Letters*, Vol. 119, p. 100601, 2017.
- [123] 田崎晴明. 量子力学, 統計力学, そして, 熱力学. 日本物理学会誌, Vol. 74, No. 6, pp. 378-379, 2019.
- [124] T. Mori, et al. Thermalization and prethermalization in isolated quantum systems: a theoretical overview. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, Vol. 51, p. 112001, 2018.
- [125] F Schäfer, et al. Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices. *Nature Reviews Physics*, Vol. 2, pp. 411-425, 2020.
- [126] L. D'Alessio, et al. From quantum chaos and eigenstate thermalization to statistical mechanics and thermodynamics. *Advances in Physics*, Vol. 65, No. 3, pp. 239-362, 2016.
- [127] R. Nandkishore and D. A. Huse. Many-Body Localization and Thermalization in Quantum Statistical Mechanics. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, Vol. 6, No. 1, pp. 15-38, 2015.
- [128] M. Schreiber, et al. Observation of many-body localization of interacting fermions in a quasirandom optical lattice. *Science*, Vol. 349, pp. 842-845, 2015.
- [129] M. Serbyn, et al. Quantum many-body scars and weak breaking of ergodicity. *Nature Physics*, Vol. 17, pp. 675-685, 2021.
- [130] H. Bernien, et al. Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator. *Nature*, Vol. 551, pp. 579-584, 2017.
- [131] K. Sacha and J. Zakrzewski. Time crystals: a review. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 81, p.

016401, 2017.

- [132] J. Zhang, et al. Observation of a discrete time crystal. *Nature*, Vol. 543, pp. 217-220, 2017.
- [133] M. A. Levin and X. G. Wen. String-net condensation: A physical mechanism for topological phases. *Physical Review B*, Vol. 71, p. 045110, 2005.
- [134] A. Kitaev and J. Preskill. Topological entanglement entropy. *Physical Review Letters*, Vol. 96, p. 110404, 2006.
- [135] A. Y. Kitaev. Fault-tolerant quantum computation by anyons. *Annals of Physics*, Vol. 303, pp. 2-30, 2003.
- [136] A. Kitaev. Unpaired Majorana fermions in quantum wires. arXiv: cond-mat/0010440, 2000.
- [137] A. Kitaev. Anyons in an exactly solved model and beyond. *Annals of Physics*, Vol. 321, pp. 2-111, 2006.
- [138] T. S. Cubitt, et al. Undecidability of the spectral gap. *Nature*, Vol. 528, pp. 207-211, 2015.
- [139] J. Bausch, et al. Undecidability of the Spectral Gap in One Dimension. *Physical Review X*, Vol. 10, p. 031038, 2020.
- [140] N. Shiraishi and K. Matsumoto. Undecidability in quantum thermalization. *Nature Communications*, Vol. 12, p. 5084, 2021.
- [141] Quantamagazine. Physicists Aim to Classify All Possible Phases of Matter. <https://www.quantamagazine.org/physicists-aim-to-classify-all-possible-phases-of-matter-20180103/>.
- [142] 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 戦略プロポーザル「トポロジカル量子戦略 ～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション～」. No. CRDS-FY2016-SP-02, 2017.
- [143] D. Greif, et al. Site-resolved imaging of a fermionic Mott insulator. *Science*, Vol. 351, p. 953, 2016.
- [144] R. Landig, et al. Quantum phases from competing short- and long-range interactions in an optical lattice. *Nature*, Vol. 532, pp. 476-479, 2016.
- [145] R. Islam, et al. Measuring entanglement entropy through the interference of quantum many-body twins. *Nature*, Vol. 528, pp. 77-83, 2015.
- [146] T. Brydges, et al. Probing Rényi entanglement entropy via randomized measurements. *Science*, Vol. 364, No. 6437, pp. 260-263, 2019.
- [147] Google Quantum AI and collaborators. Observation of Time-Crystalline Eigenstate Order on a Quantum Processor. arXiv: 2107.13571, 2021.
- [148] S. Ryu and T. Takayanagi. Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT. *Physical Review Letters*, Vol. 96, p. 181602, 2006.
- [149] 宇賀神知紀, 西岡辰磨. 場の量子論と量子情報——相対エントロピーとその応用. 日本物理学会誌, Vol. 76, No. 7, pp. 435-443, 2021.
- [150] 佐々田槇子. 流体力学極限の幾何学的考察 (岡潔女性数学者セミナー、2021年9月24日). http://www.nara-wu.ac.jp/omi/oka_seminar_women/04/06.pdf.
- [151] Y. Hirono, et al. Structural reduction of chemical reaction networks based on topology. *Physical Review Research*, Vol. 3, p. 043123, 2021.
- [152] N. Ozawa. About the Connes embedding conjecture: algebraic approaches. *Japanese Journal of Mathematics*, Vol. 8, No. 1, pp. 147-183, 2013.
- [153] Z. Ji, et al. MIP*=RE. arXiv: 2001.04383, 2020.
- [154] Z. Ji, et al. MIP*=RE. *Communications of the ACM*, Vol. 64, No. 11, pp. 131-138, 2021.

- [155] ボブ・クック (著), アレクス・キッシンジャー (著), 川辺治之 (訳). 圏論的量子力学入門. 森北出版, 2021.
- [156] 妹尾堅一郎. 「互学互修」モデルの可能性—先端的専門職教育における「学び合い・教え合い」—. コンピュータ&エデュケーション, Vol. 15, pp. 24-30, 2003.
- [157] Stable Diffusion Online. <https://stablediffusionweb.com/>.
- [158] 東京大学生物普遍性研究機構. <http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/UBI/index.html>.
- [159] 理化学研究所数理創造プログラム (iTHEMS). <https://ithems.riken.jp/ja>.
- [160] K. Adachi, et al. Universal constraint on nonlinear population dynamics. *Communications Physics*, Vol. 5, p. 129, 2022.
- [161] 理化学研究所. 進化・生態ダイナミクスの共通法則—生物の個体群変化を物理学的な関係式で記述する— (2022年6月1日). https://www.riken.jp/press/2022/20220601_1/.
- [162] Y. Hirono, et al. Structural reduction of chemical reaction networks based on topology. *Physical Review Research*, Vol. 3, p. 043123, 2021.
- [163] 理化学研究所. 複雑な化学反応ネットワークを単純化する—ホモロジー代数を用いた縮約手法の確立— (2021年12月22日). https://www.riken.jp/press/2022/20220601_1/.
- [164] 科学技術振興機構研究開発戦略センター. 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「情報と計算の物理と数理」. No. CRDS-FY2022-WR-11, 2023.
- [165] 田崎晴明. 熱力学—現代的な視点から. 培風館, 2000.

(ウェブサイトは2023年2月22日時点)

作成メンバー

総括責任者	木村 康則	上席フェロー	(CRDSシステム・情報科学技術ユニット)
リーダー	嶋田 義皓	フェロー	(CRDSシステム・情報科学技術ユニット)
メンバー	赤木 浩	特任フェロー	(CRDSナノテクノロジー・材料ユニット)
	大山 義仁	JST PM 研修生	
	佐川 みすず	主任専門員	研究プロジェクト推進部
	的場 正憲	フェロー	(CRDS システム・情報科学技術ユニット)
	眞子 隆志	フェロー	(CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット)
	宮下 哲	フェロー	(CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット)
	吉脇 理雄	フェロー	(CRDS システム・情報科学技術ユニット)

戦略プロポーザル

CRDS-FY2022-SP-07

情報・物理・数理の共創

～非平衡ダイナミクスの理解が見せる新たな景色～

STRATEGIC PROPOSAL

Co-creation of Information Science, Physics and Mathematics

-Novel landscapes from the understanding of
non-equilibrium dynamics-

令和 5 年 3 月 March 2023

ISBN 978-4-88890-835-1

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>