

# 現代物理学から俯瞰するプリゴジンが探求した不可逆性

小出 明広 (Akihiro Koide)

無所属

時間に向きがあることを時間の矢と呼び、その解釈について哲学と科学とで交り合いながらもそれぞれの問題意識で研究が行われてきた。本発表では、哲学と科学の橋渡しを推進したプリゴジン氏の研究を現代物理学の視点で整理することで、時間研究に貢献することを試みる。

哲学的時間研究では、主観的時間と客観的時間のそれぞれにおける過去・現在・未来、およびそれらの間の関係性によって、時間論を大まかに分類できる[1]。科学、特に物理学における時間研究は、客観的時間における過去から未来への不可逆性に焦点が当てられている。不可逆性を理解する上での困難は、微視的運動からは時間の矢が読み取れないのに対し、巨視的現象からは時間の矢が読み取れる点である[2]。微視的運動は Newton 方程式や Schrödinger 方程式などで支配される動力的時間発展に従い、その結果、時間反転対称性によりビデオを逆再生したような運動も現実に許容された運動となる（つまり可逆である）。一方で、巨視的現象は熱力学第二法則（エントロピー増大則）により、異なる熱平衡状態間の遷移は、乱雑さと関連するエントロピーという物理量の増大する方向のみが実現するため、ビデオを逆再生したような状態遷移は起こらない。還元論的に考えれば、巨視的現象は膨大な微視的運動によって発現していると考えられ、可逆的な運動からの不可逆性の創発を説明することは不可逆性の問題と呼ばれる[2]。

微視的描像の運動理論から巨視的描像の運動理論に移るためには、粗視化と呼ばれる方法が用いられる。粗視化は大きく2パターンに分けられ、①平均操作等を行うことで微視的状态における自由度を減らして巨視的状态へ移行する方法と、②時空間スケールを大きくして対象とする現象を扱い易くする方法、がある。粗視化によっては、減らした自由度がもたらす寄与を確率変数として扱うことで、時間発展の様式が確率過程へと変換される。これらの粗視化は、人間の観測限界や理論上の都合による事情から導入されたと解釈でき、人為的側面が強い。プリゴジンは、粗視化によって変換された運動系の時間発展は、粗視化前の運動系全体の特徴をほぼ完全に反映していることを、複素スペクトル理論の開発を通して主張した[3]。すなわち、自然な粗視化を提唱した。

この自然な粗視化により、確率過程的な運動の記述への変換の前後で情報は失われず、不可逆性、ないしは熱力学第二法則が原理たり得ることを説いた[3,4,5]。第二法則を含めた熱力学法則を原理とすれば、巨視的な不可逆性が先んじて存在し、不可逆性をもたらす多体的な相互作用を減じていくと、(微視的な)可逆性が発現する見方もできよう。この描像は、熱力学を基礎と置く立場を強化すると想像される。

ただし、プリゴジンの理論は原理的に時間的周期性の無い(連続スペクトルを持つ)

運動系のみを対象としている。そのため、原理的に必ず初期状態に運動が回帰する（離散スペクトルのみを持つ）孤立量子系における熱平衡化の問題には触れていない[6]。熱平衡には、回帰現象を持つ運動系には熱平衡状態は無いとする立場と、回帰現象の周期が非常に長ければ熱平衡状態が存在するという立場があり、プリゴジンは前者である。後者での、孤立量子系の熱平衡化に深く関連した理論として、固有状態熱化仮説（ETH）が広く知られている[6]。先端的な研究により仮説が検証され、仮説成立の範囲や、より包括的な熱平衡状態の記述が模索されている[6]。

不可逆性は、Poincaré-Fermi の定理と Kolmogorov-Arnol'd-Moser の定理により、十分な強さの非線形相互作用によって発現することが示されている[7]。これらは古典系を対象にしているため、孤立量子系に対する上記に対応した理論の開発・発見が望まれる。回帰現象を許容する立場では、典型性と呼ばれる、初期状態から運動状態が時間発展で離れるとほとんどの状態は熱平衡時の物理量を与えるという性質により、不可逆性が発生する考え方がある[8]。ただし、非線形相互作用との関係は単純ではない[9]。一方で、プリゴジンは不可逆性の起源を、連続スペクトルを発現させる運動系が持つ性質に帰属させており[5]、非線形相互作用の中でも細分化された一部のクラスで不可逆性が発生すると考えられる。孤立量子系においても、一部の系では非線形相互作用があるにも関わらず熱平衡化しないことが報告されており[9]、詳細な分類が今後進むと予想される。

理想的には、古典系・量子系、および離散・連続スペクトルを持つ運動系を包括する理論が望ましい。しかし、一般的な熱平衡状態を定義できないことが最近理論的に示され[10]、上記の住み分けが解消できない可能性もある。熱平衡状態だけでなく、非平衡定常状態も含めた不可逆性の研究は、まだまだ未知に満ち溢れている。現代物理学の潮流として、確率過程を最初から前提とした「ゆらぎの熱力学」や、不可逆性を最初から前提とした「非エルミート量子力学」が盛り上がりを見せている。これら探求が成熟した後に、改めてそれらの起源へと立ち返ることで、科学における「時間の矢」が時間研究の方向を指し示すと期待される。

- [1] 平井靖史（2022）『世界は時間でできている』青土社.
- [2] 田崎秀一（2000）『カオスから見た時間の矢』講談社.
- [3] 田崎秀一, 物性研究 **60(1)** (1993) 1.
- [4] イリヤ・プリゴジン（2019）『存在から発展へ（新装版）』みすず書房.
- [5] B. Misra, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **75** (1978) 1627.
- [6] T. Mori, T. N. Ikeda, E. Kaminishi and M. Ueda, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **51** (2018) 112001.
- [7] 戸田盛和、斎藤信彦、久保亮伍、橋爪夏（2011）、『統計力学（新装版 現代物理学の基礎 5 巻）』岩波書店
- [8] H. Tasaki, *J. Stat. Phys.* **163** (2016) 937.
- [9] 森貴司, 物性研究・電子版 **8(1)** (2020) none.
- [10] N. Shiraishi and K. Matsumoto, *Nature Communications* **12** (2021) 5084.