

摩擦と散逸は粗視化である — 微視で保存されるエネルギーが、なぜ「失われる」ように見えるか：揺動散逸定理を橋として — [論文78]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan | 山岸勇輝ラボ

2026年8月

— From thinking to syncing. —

要旨

論文77は「時間の矢は微視法則でなく粗視化（有限の解像度）に宿る」ことを、リューヴィルの定理を土台に示した。本稿はその具体例として、教科書が「摩擦でエネルギーが熱になって失われる」と述べる散逸現象を扱う。主張は明快である：エネルギーは失われていない。微視的にはリューヴィルの定理により全エネルギーは保存され（論文77）、摩擦とは系のエネルギーが、我々が分解できない微視自由度（熱＝環境・浴）へ移送される過程である。「損失」は、その微視自由度を粗視化して見ないときにだけ現れる見かけである。橋渡しとなる王道の道具は揺動散逸定理（久保）：ランジュヴァン方程式 $m\dot{v} = -\gamma v + \xi(t)$ において、散逸（摩擦係数 γ ）と揺動（熱雑音 ξ ）は、環境への同一の結合の二つの顔であり、 $\langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$ で結ばれる。つまり摩擦は「エネルギーを捨てる装置」ではなく、系と浴のあいだの可逆な微視力学を粗視化した実効記述である。宇宙OSのレンズで読めば：熱は「消えた」のではなく解像度の限界で生じた"丸め"が、バックエンド（+C=溜め、論文62）へ回収された——ただし「OS」「回収」はレンズであり検証可能な主張ではない。射程：揺動散逸定理・開放系（Caldeira-Leggett）は借り物の標準的事実であり、本稿は新しい数学も新しい予言も生まない。環境の起源を導かない・第二法則を新たに証明しない。微視の保存と粗視の損失は別の量・別の話であり融合しない（別根、論文58/48）。本稿は論文77を摩擦という一点に適用した構造的解釈にとどまる。

本稿の位置づけ：本稿は確立された物理法則・定理の構造的解釈である。新しい物理法則の発見も、未解決問題の解決も主張しない。用いる揺動散逸定理・ランジュヴァン方程式・開放系（system-bath）・粗視化はすべて標準的な確立された道具であり、本稿はそれらに新たな定理を加えない。「宇宙OS」「ガベージコレクション」「丸め誤差」「バックエンド」といった語は解釈のためのレンズ・比喻であって、検証可能な主張ではないことを、あらかじめ明示する。

1. 序：論文77から摩擦という具体例へ

論文77は、リューヴィルの定理（微視的相空間体積は保存・可逆・矢なし）を土台に、時間の矢は微視法則でなく粗視化＝有限の解像度に宿ることを示した。第二法則の不可逆性は「情報を落とす操作」を一つ導入して初めて現れる、というのが標準的な描像であった。

本稿は、その最も身近な具体例を取り上げる——摩擦である。教科書は「摩擦や空気抵抗でエネルギーが熱になって失われる」と教える。だが論文77の立場からは、この「失われる」は正確な言い方ではない。微視的にはエネルギーは一切失われていない。本稿は、摩擦が「損失」ではなく「粗視化された移送」であることを、揺動散逸定理という王道の橋を通して示す。

2. 素朴な描像とその訂正

素朴な描像はこうである：「動いている物体は摩擦で減速し、運動エネルギーは熱になって失われる。」前半は正しい。訂正すべきは「失われる」の一語である。

観察 2.1（熱は"消えた"エネルギーではない）

熱とは、我々が個別に追跡しない微視自由度（分子の乱雑な運動）が担うエネルギーのことである。摩擦とは、系の秩序だった運動エネルギー（少数の巨視自由度）が、膨大な微視自由度（環境・浴）へ移し替えられる過程にほかならない。微視的には——系と環境を合わせた全系のハミルトン力学として——エネルギーは厳密に保存される（論文77・リューヴィル）。「損失」は、環境の微視自由度を粗視化して見ないときにだけ現れる見かけである。

3. 開放系の設定：系＋浴と、浴の積分消去

この描像を標準的に定式化するのが開放系（system-bath）の枠組みである。全系を「注目する系」と「膨大な自由度をもつ環境（浴）」に分け、全体は可逆なハミルトン力学（論文76の (T^*M, ω, H) 、論文77のリューヴィル）に従う。ここで浴の自由度を積分消去（粗視化）すると、系だけの実効的な運動方程式に摩擦項が現れる。

標準的事実（ランジュヴァン方程式）

系＋浴の可逆なハミルトン力学から浴を積分消去すると、系の運動は実効的に

$$m\dot{v} = -\gamma v + \xi(t)$$

と書ける（Caldeira–Leggett 模型など）。ここで $-\gamma v$ は摩擦（散逸）、 $\xi(t)$ は浴からの揺動力（熱雑音）である。どちらも「系と浴の同一の結合」から生じる。全系は可逆だが、浴を粗視化して落とした結果、系だけを見ると不可逆な摩擦が現れる。

摩擦は基本法則ではない。それは可逆な微視力学を、環境を粗視化して得た実効記述である。まさに論文77の「矢は粗視化に宿る」の、摩擦版の実装である。

4. 揺動散逸定理：散逸と揺動は同じ結合の二つの顔

ここに本稿の要となる王道の事実が入る。摩擦（散逸 γ ）と熱雑音（揺動 ξ ）は無関係の二つではなく、同一の微視結合の表と裏である。

標準的事実（揺動散逸定理・久保 1966）

温度 T の熱平衡において、摩擦係数 γ と揺動力の相関は

$$\langle \xi(t) \xi(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$$

で結ばれる。散逸を生む結合が、そのまま揺動（熱雑音）をも生む。「摩擦でエネルギーを浴に渡す」働きと「浴からランダムに蹴られる」働きは、同じ結合の二つの顔であり、その比が温度 T を定める。

観察 4.1（摩擦は"捨てる装置"ではなく"やりとりの粗視化"）

揺動散逸定理が語るのは、摩擦が一方向的にエネルギーを捨てる装置ではないということである。系は浴へエネルギーを渡し（散逸）、同時に浴から受け取っている（揺動）。平均として系が減速するのは、平衡へ向かう双方向のやりとりの粗視化された正味にすぎない。微視では可逆な授受、粗視では不可逆な摩擦。

5. エネルギーの行き先：+C という溜め（論文62）

では移されたエネルギーはどこへ行くのか。微視的には浴の運動エネルギー（熱）としてそこに在り続ける。粗視化した簿記では、それは系から見て「アクセスできない背景」——溜め（reservoir）——に計上される。

体系のレンズ（比喻）で読むと——あくまでレンズであり検証可能な主張ではない——次のようになる。摩擦とは、宇宙OSがピクセル（粒）の有限解像度でこれ以上細かく追跡することをやめた"境界"であり、そこで生じた"丸め"の分が、熱としてバックエンドの溜め（論文62の積分定数 +C）へ回収される（熱力学的ガベージコレクション）。エネルギーは消えていない——解像度の外側に、非破壊で保管されている（論文77：OSのメモリは微視的に非破壊）。「丸め」「回収」「バックエンド」は比喻であり、標準物理の内容（浴への移送）を言い換えたものにすぎない。

6. 論文77・75との整合：摩擦の矢は粗視の矢

観察 6.1（摩擦は 77 の一適用）

摩擦の不可逆性（速度が一方向に減衰する矢）は、微視法則の矢ではない——系＋浴の全系はリューヴィルで可逆（論文77）。摩擦の矢は、浴を粗視化したことで生じた粗視の矢である。ゆえに摩擦は論文77（矢は粗視化に宿る）の具体例であり、論文75（因果球エントロピーの増大＝粗視・境界の矢）とも同じ層に属する。微視の保存と粗視の損失は、別の量・別の話である（別根、論文58/48）。

こうして摩擦は、位相空間三部作——76（ヒンジ (T^*M, ω, H) ）・77（リューヴィルと矢）——の自然な続きとして位置づく：76 が舞台、77 が"矢は粗視に宿る"の一般則、78 が摩擦という最も身近なその実装。

7. 射程（何を示し、何を示さないか）

示すこと（記述的）：

- 摩擦・散逸は「エネルギー損失」ではなく、系から未分解の微視自由度（浴）へのエネルギー移送の粗視化である（観察2.1・3節）。
- 散逸と揺動は同一の結合の二つの顔であり、揺動散逸定理 $\langle \xi \xi \rangle = 2\gamma k_B T \delta$ で結ばれる（4節）。摩擦は"捨てる装置"でなく"やりとりの粗視化"（観察4.1）。
- 摩擦の不可逆性は論文77の「矢は粗視化に宿る」の一適用であり、75とも同層（観察6.1）。位相空間三部作（76・77）の自然な続き。

示さないこと（禁欲）：

- 新しい数学ではない。ランジュヴァン方程式・揺動散逸定理・開放系はすべて標準的である。本稿は定理を加えない。
- 環境（浴）の起源を導かない。なぜ宇宙に膨大な微視自由度＝熱浴があるのか、その初期条件（低エントロピーの過去）は本稿では説明しない（論文75・77と同じ未解決の問い、Penroseの予想）。
- 第二法則を新たに証明しない。本稿が示すのは「摩擦は損失でなく移送の粗視化」という読みであって、不可逆性そのものの導出ではない。
- 微視の保存と粗視の損失を融合しない。両者は別の量・別の層である（別根、論文58/48）。「エネルギーは保存するのに使えるエネルギーは減る」は矛盾ではなく、異なる二量の異なる振る舞いである。
- 新しい予言をしない。本枠組みは標準的な統計力学・散逸理論と同じ観測結果を与える。ゆえに本稿は第2層（構造的解釈）にとどまる。

8. 結論

摩擦と空気抵抗は、古典物理が言う「エネルギーの損失」ではない。微視的にはリューヴィルの定理によりエネルギーは厳密に保存され（論文77）、摩擦とは系のエネルギーが、我々が分解しない微視自由度（浴＝熱）へ移送される過程の、粗視化された実効記述である。揺動散逸定理は、その移送（散逸）と、裏側の受け取り（揺動）が同一の結合の二つの顔であることを示す——摩擦は"捨てる装置"ではなく、可逆な授受の粗視である。

宇宙OSのレンズで言えば——エネルギーは消えていない。解像度の限界で生じた"丸め"が、熱としてバックエンドの溜め（+C）へ非破壊で回収されているだけである。ただし「OS」「回収」はレンズであり、示したのは標準的な散逸理論の中に論文77の一適用があるという観察にすぎない。なぜ宇宙に低エントロピーの過去（＝働く浴）があるのかという最深の問いは、依然として開かれたままである。それでも、摩擦の"損失"を"粗視化された移送"と位置づけ直すことは、位相空間三部作をもう一枚、身近な地面の上で確かめ直す。

参考文献

1. Einstein, A. (1905). *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (Brownian motion). *Annalen der Physik* 17, 549–560.
2. Nyquist, H. (1928). *Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors*. *Phys. Rev.* 32, 110–113.
3. Kubo, R. (1966). *The fluctuation-dissipation theorem*. *Rep. Prog. Phys.* 29, 255–284.
4. Caldeira, A. O. and Leggett, A. J. (1983). *Path integral approach to quantum Brownian motion*. *Physica A* 121, 587–616.
5. Zwanzig, R. (2001). *Nonequilibrium Statistical Mechanics*. Oxford University Press.
6. Yamagishi, Y. (2026). *The Reframing of the Cosmological Constant / +C* [論文62]. Zenodo: 10.5281/zenodo.21598317.
7. Yamagishi, Y. (2026). *Liouville's Theorem and the Arrow of Time* [論文77]. Zenodo: 10.5281/zenodo.21722473.

8. Yamagishi, Y. (2026). *A Covariant Symplectic Structure on Phase Space $\mathbf{T^*M}$: The Hamiltonian Hinge* [論文76]. Zenodo: 10.5281/zenodo.21722145.
9. Yamagishi, Y. (2026). *Distinct-Roots Discipline for Numerical Coincidences* [論文48]. Zenodo. 10.5281/zenodo.21602525

— *From thinking to syncing.* —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)