

# A01 ゲージ・重力対応を用いた非平衡物理学への新アプローチ

中央大学工学部物理学科 中村 真

本研究ではゲージ・重力対応を用いた非平衡物理学の研究アプローチを確立することを目的として、以下の研究を行った。

## 【研究手法の背景】

ゲージ・重力対応とは、ゲージ場の量子論と重力理論（一般相対性理論）の間の等価性であり、この対応関係を用いることで、ゲージ粒子の多体系を重力理論に置き換えて解析することが可能となる。重力理論側では方程式の解として、熱力学の法則や温度の概念を持つブラックホール解が自然に現れることから、ミクロとマクロをつなぐ粗視化のプロセスが重力理論に自然に含まれていると考えられる。本研究では、ゲージ・重力対応のこのような顕著な性質を応用し、熱浴に接した荷電粒子多体系に一定の外力（電場）が印加された非平衡定常状態の性質を解析した。ゲージ・重力対応において、このような系の物理的性質は、Dブレーンと呼ばれる超弦理論のソリトンの力学で記述される。Dブレーンの力学を曲がった時空上で解析することで、この系における非線形電気伝導度の計算や、揺らぎが従う有効温度の計算が可能となることが知られている [1]。本研究では、このようなDブレーンの解析を通じて、以下の項目に関する研究を行った。

## 【具体的な研究内容】

### 1. 非平衡定常状態における有効温度の解析

先行研究[2]では、非平衡定常状態の有効温度がゲージ・重力対応の手法で系統的に調べられている。その結果、系を構成する微視的理論が同じ場合でも、重い荷電粒子を熱浴中で牽引したランジュバン系では有効温度が熱浴の温度より下がる一方、同じ熱浴中に質量（これは物性系でのギャップに相当する）ゼロの荷電粒子の多体系を導入して外部電場を印加した導体系では、非平衡へのドライブにより有効温度が熱浴の温度よりも上がる場合があるなど、有効温度の振る舞いに顕著な差が見出されていた。本研究では、この二つの有効温度の振る舞いの整合性を考察した。ここでは、導体系における電荷密度と電荷の質量の新たなパラメータを導入し、導体系をランジュバン系での設定に近づける工夫を行った。解析の結果、電荷密度と荷電粒子質量の大きな、導体系の設定がランジュバン系に近づくと考えられる極限では、導体系の有効温度がランジュバン系の有効温度に一致することが示された。これにより、ゲージ・重力対応における有効温度の解析の整合性が確認された。また、多くのゲージ・重力対応のモデルにおいて、外部電場による電荷の対生成が有効温度を上げる効果を持つこと、外力による電荷の輸送は、有効温度を下げる効果を持つことが分かった。この結果は文献[3]として出版された。

### 2. ゲージ・重力対応で記述される導体モデルの解析

ゲージ・重力対応では、線形応答を超えた領域での解析が可能となる利点がある一方、計算過程が重力理論に置き換えられているため、具体的にどのような物理プロセスが計算結果を作り出しているのか明確ではないという「欠点」もあった。そこで、本研究では、ゲージ・重力対応における荷電粒子系で物理プロセスを仮定し、これに基づいた現象論的な計算とゲージ・重力対応による計算結果を比較することで、系内部の物理プロセスを明らかにする試みを行った。ここでは、外力を受けて熱浴中を運動する荷電粒子は Drude 的なモデルに従うものとした。ただし、通常の Drude モデルでは緩和時間を定数と置くが、ここでは緩和時間は荷電粒子の速度に依存できるものとした。さらに、外部電場により正負荷電粒子対が対生成する効果も考慮し、キャリア密度（正電荷と負電荷の粒子数密度の和）もモデルの変数に加えた。このような現象論的モデルによる非線形電気伝導度とゲージ・重力対応から得られ

る非線形電気伝導度を比較したところ、整合のとれた一致が見出され、その結果、荷電粒子の緩和時間やキャリア密度を、系のパラメータ（熱浴の温度、化学ポテンシャル、外部電場や外部磁場、および微視的理論を規定するパラメータ等）の関数として得ることができた。この結果、ゲージ・重力対応で得られていた負性微分電気伝導などの非線形な振る舞いを、上記のような粒子対生成を取り入れた Drude 的なモデルで説明する道筋をつけることができた。この研究成果は文献[4]として出版された。

### 3. 非平衡相転移における臨界指数の計算

先行研究[5]では、非平衡定常系の非線形領域において新奇な非平衡相転移がゲージ・重力対応の手法で見出された。この相転移は、電気伝導度をオーダーパラメータとし、系を記述するコントロールパラメータの一つとして電流密度を用いた際に電気伝導度（一次相転移）または微分電気伝導度（二次相転移）が不連続となる転移である。文献[5]では、 $\beta$ および $\delta$ に相当する臨界指数が得られていたが、他の臨界指数は計算されていなかった。本研究では新たに感受率に相当する物理量として電気伝導度を電流密度で変分した量を定義し、この量の臨界点近傍の振る舞いから $\gamma$ に相当する臨界指数を計算した。この結果、既に得られていた $\beta$ 、 $\delta$ とともに、 $\gamma$ についても平衡系のランダウ理論の値（ $\beta=1/2$ 、 $\delta=3$ 、 $\gamma=1$ ）に整合する結果が得られた。この結果は、[5]で発見された非平衡相転移にも、背後にランダウ理論に類似の有効理論が存在することを示唆する。現在、この成果を論文としてまとめている[6]。

### 4. 平衡系の温度および非平衡定常状態の有効温度のローレンツ変換

温度 $T$ のローレンツ変換については、ローレンツ因子を $\gamma$ とする変換後の温度 $T' = \gamma^p T$ において $p=1, 0, -1$ の諸説が混在している。本研究では、平衡系をゲージ・重力対応によりブラックホール時空にマップし、ブラックホールのホーキング温度の変換性から温度のローレンツ変換を決定した。その結果、 $p=-1$ が一般的に得られることを示した。同様の議論は非平衡定常状態の有効温度についても適用でき、ローレンツ変換に対して有効温度も平衡系の温度と同じ変換を受けることを示した。この結果は、現在論文としてまとめている[7]。

### 5. その他

上記の他にも、複数のテーマについて研究を手掛け、予備的な結果を得ている。ゲージ・重力対応における非平衡定常状態の記述では、場の理論側の紫外発散は重力理論側での古典的な計算の発散として再現されるため、場の理論同様に適切にくりこむ必要がある。しかし、外部電場等を印加した際に生じる紫外発散のくりこみに関して任意性が生じ、その任意性の固定方法が定かではないという問題があった。本研究では、このくりこみ処方について重力理論の整合性の観点から考察し、処方の任意性を固定するための方法を考案した。現在、さまざまな計算において、このくりこみ処方の妥当性を検証している。またこの他にも、佐々・田崎の定常状態熱力学にて提唱されている巨視的物理量の間関係性についても調べた。具体的には、定常状態の電流方向の圧力 $P$ は変数 $J$ について下に凸となることが予想されているが、本研究では非線形領域において非平衡定常状態の電流方向の圧力を電流の関数として系統的に解析した。これらの成果についても近日中に出版できるよう準備を進めている。

### 参考文献：

- [1] 中村真, 日本物理学会誌 70 No. 7 (2015) pp. 510-518, およびこの引用文献を参照.
- [2] S. Nakamura and H. Ooguri, *Phys. Rev. D* 88 (2013) 12, 126003.
- [3] H. Hoshino and S. Nakamura, *Phys. Rev. D* 91 (2015) 2, 026009.
- [4] H. Hoshino and S. Nakamura, *Phys. Rev. D* 96 (2017) 6, 066006.
- [5] S. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012) 120602.
- [6] M. Matsumoto and S. Nakamura, in preparation.
- [7] H. Hoshino and S. Nakamura, in preparation.