

## 論文の内容の要旨

本博士学位請求論文（以下、本論文とする）では、非平衡定常状態における電流駆動型の相転移現象をゲージ・重力対応の手法を用いて解析している。非平衡臨界点における臨界指数を数値計算により求めた他、新たな非平衡 3 重臨界点を発見し、そこでの臨界指数の計算結果について論じる内容となっている。

非平衡状態における巨視的物理量の期待値の計算は現代物理学における挑戦的課題の一つである。本論文が論じる非平衡系は、定常電流が流れる非平衡定常状態であるが、そのパラメータ領域は印加電場と電流密度が線形の関係にはない非線形領域を扱っている。このような系における物理量の計算手法として、本論文ではゲージ・重力対応を用いている。ゲージ・重力対応とは、超弦理論から提案される対応原理であり、ある種の非可換ゲージ理論を高次元の曲がった時空上の古典重力理論に置き換える対応関係である。この置き換えにより、非可換ゲージ理論で設定された非平衡定常状態を曲がった時空上の場の古典論に対応させ、電気伝導度などの物理量を計算している。

本論文で扱う場の理論側の具体的な微視的理論は  $N=2$  超対称ゲージ理論の超多重項を含んだ  $N=4$  超対称ゲージ理論である。この超多重項を構成する粒子が持つ大域的対称性に関する電荷に定常的に外部電場を印加することで定常電流を生成し、 $N=4$  超対称ゲージ理論を熱浴として用いることで、非平衡定常状態を実現している。本論文では、この系に対してゲージ・重力対応を適用し、D3-D7 モデルとよばれるモデルへの置き換えを行っている。この D3-D7 モデルでは、熱浴は漸近的に反ド・ジッター時空となる 5 次元のブラックホール時空として実現されており、この時空上に高次元の膜状の物体である D7-ブレーンが配置されている。本論文ではこの D7-ブレーンの古典力学を解析し、D7-ブレーンの形状や、D7-ブレーン上の電磁場の配位を求めることで、系の秩序変数や電気伝導度などを読み取っている。D7-ブレーンの挙動の解析では非線形微分方程式を解く必要があり、数値計算が用いられている。

本論文で報告している主要な成果としては、(1) 電流駆動型非平衡相転移における臨界指数  $\gamma$  の定義とその計算結果、(2) 定常電流存在下におけるカイラル対称性の自発的破れに伴う非平衡相転移の発見、特に非平衡領域での 3 重臨界点の発見、(3) 前項 (2) の臨界点における臨界指数  $\beta$  の計算結果である。また、項目 (1) の相転移点近傍での動的臨界指数の計算に向けた解析や、ゲージ・重力対応におけるくりこみ処方についても、新たな試みを行っている。これらの成果としては数値計算の誤差範囲内で  $\gamma=1$ 、また数値計算と解析的な考察の双方から  $\beta=1/2$  を得ており、背後に平衡系のランダウ理論と類似の有効理論が存在する可能性を論じている。

## 論文審査の結果の要旨

### 【論文の主題と当該分野における位置づけ】

本博士学位請求論文（以下、本論文とする）は非平衡定常状態における相転移現象をゲージ・重力対応の手法を用いて解析した論文である。具体的には、定常電流の流れる非平衡定常状態を非可換ゲージ理論の枠組みで設定し、これをゲージ・重力対応により 10 次元の超重力理論に置き換えて、一般相対性理論の手法により秩序変数等の物理量の期待値のパラメータ依存性を解析している。一般に、線形応答を超えた領域での非平衡現象の解析は非常に挑戦的な課題であるが、この問題にゲージ・重力対応を応用する試みは既存の手法にはない新たな試みであり、当該分野において新たな研究の方向性を開拓する研究であると言える。

### 【論文の構成】

本論文の構成は以下の通りである。1 章では本論文の概要をまとめている。2 章では本論文の一つの主眼となる臨界現象について平衡系の場合に対する知見をまとめている。3 章では本論文で用いるゲージ・重力対応について基礎事項をまとめている。本論文における独自の研究結果は 4 章以降に記載されている。4 章では本研究で用いるモデルの構成を説明し、その解析結果を詳細に報告している。5 章では得られた結果と今後の研究の展望が述べられている。付録 A、付録 B では解析の基本となる反ド・ジッター時空の基礎事項とゲージ・重力対応におけるくりこみ処方についてまとめている。

### 【論文の独自性や成果】

本論文で達成された独自の成果は以下の通りである。(1) 電流駆動型非平衡相転移における臨界指数  $\gamma$  を初めて定義し、その値を数値計算により初めて計算した。(2) カイラル対称性の自発的破れと回復に対する定常電流の影響を初めて解析し、電流駆動型の 1 次相転移、2 次相転移、および 3 重臨界点を発見した。(3) 前項 (2) で述べた 2 次相転移点および 3 重臨界点における臨界指数  $\beta$  を初めて計算した。以上の主要な成果に加え、項目 (1) の相転移点近傍での動的臨界指数の計算に向けた解析も行っており、また付録 B で述べられたくりこみ処方でも新たな試みを行っている。

### 【論文の評価・論文の課題】

本論文におけるこれらの複数の成果は博士学位請求論文として十分な内容を有している。計算により得られた臨界指数の値は、平衡系のランダウ理論が予言する値と一致しているが、これは、非平衡定常状態の相転移現象に対しても背後にランダウ理論と同様の有効理論が存在している可能性を示唆するものである。本論文の今後の課題としては、他の未計算の臨界指数の計算、非平衡相転移の全パラメータ領域での相図の作成が挙げられる。また、非平衡定常状態における熱力学ポテンシャルを重力理論によってどのように記述し得るかという、より根本的な問いも存在している。今後これらの課題に関する研究を進めるにあたり、本論文は重要な位置づけを占めており、この意味でも本論文は博士学位請求論文として十分な内容を持つものと結論する。