

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	さかたに ゆうほう 酒谷 雄峰
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科・物理学宇宙物理学専攻
(学位論文題目) Relativistic viscoelastic fluid mechanics and the entropic formulation of continuum mechanics (相対論的粘弾性体力学と連続体力学のエントロピーに基づいた定式化)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 川合 光 教授 青山秀明 教授 福間将文 准教授

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	酒谷 雄峰
論文題目	Relativistic viscoelastic fluid mechanics and the entropic formulation of continuum mechanics		

(論文内容の要旨)

本申請論文は、相対論的連続体力学の非平衡熱力学に基づいた再定式化および相対論的粘弾性体力学に関して研究を行ったものである。

標準的な相対論的連続体力学の定式化は、エントロピー生成の正定値性を要請して微分展開の最低次で散逸カレントの関数形を決定し、そのカレントを用いて基礎方程式を与えるという手法で定式化されている。このような手法では、確かに熱力学第二法則と矛盾しない理論が構築できるが、全エントロピーを最大にする平衡状態へ向かって連続体が熱的な緩和を行うという描像は明確な形では理解できない。

本論文では、このような熱的緩和の過程を非平衡熱力学的な視点からより明確に理解するため、Onsager の線形回帰理論に基づいて連続体力学を定式化し直した。まずは、非平衡状態にある一般の連続体の全エントロピーを評価する汎関数 (エントロピー汎関数) を導入し、それと、連続体が平衡状態に達したときの全エントロピーの値との差分を熱力学変数で汎関数微分することで熱力学力を求めた。そして、この熱力学力を用いて熱力学変数の不可逆な時間発展を決定した。特に、保存量の密度に相当する熱力学変数に対しては、不可逆な時間発展が散逸カレントの発散の形にまとめられることを示した。また、この枠組みが標準的な相対論的流体力学や相対論的粘弾性体力学の基礎方程式を正しく再現することも確認した。さらに、粘性流体のエントロピー汎関数と非平衡ブラックホールのエントロピーとの関連についても議論した。

標準的な相対論的流体力学では、熱力学変数の発展方程式が放物型の微分方程式になることが知られている。そのため、短波長の波は無限の速度で伝播してしまい因果律が破れるという問題が生じる。流体力学は長波長のモードのみをうまく記述する有効理論であり、これは理論自体に深刻な問題が含まれているということを意味するわけではないが、例えば相対論的な運動をする流体の数値シミュレーションなどを行う際には、このような因果律の破れが原因となって非物理的な解が生じるということが知られている。そこで、双曲型の微分方程式を得るため、流体力学の基礎方程式に高階微分補正を加える因果的流体力学と呼ばれるモデルが幾つか提案されており、流体の相対論的なダイナミックスを記述する際の基礎的なモデルとして用いられている。

一方、流体の基礎方程式に補正を加えようという他のアプローチとしては粘弾性体理論が知られている。ただし、これまでに得られていた粘弾性体理論は主に非相対論的な形でしか定式化されていなかったため、本論文では、これまでに知られていた様々な非相対論的粘弾性体力学を特別な場合として含む一般的な粘弾性体モデルを、一般共変な形で定式化した。そして、非常に幅広いパラメータ領域で双曲型の微分方程式を与えるモデルが得られることを示した。さらに、このモデルは長時間極限では常に標準的な粘性流体力学に帰着し、流体力学の短時間での振る舞いを修正したモデルになっている。これらの点から、この粘弾性体モデルは一種の因果的流体力学と呼ぶことが出来る。さらに本論文では、この粘弾性体モデルを重イオン衝突実験の解析に応用できるのではないかという試みについても議論している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本申請論文は、相対論的連続体力学に関して、連続体力学の非平衡熱力学に基づいた再定式化および相対論的粘弾性体力学に関する研究という二つの研究について申請者の研究の成果をまとめたものである。

まず、非平衡熱力学に基づく再定式化に関して、従来は Onsager の線形回帰理論を連続体力学に適用する際には、加算的でない示強性変数と保存量に関係する密度量とで異なる取り扱いをする必要があり、一貫した説明は与えられていなかった。一方、本申請論文のアプローチでは、加算的でない示強性変数と保存量の区別はエントロピー汎関数への熱力学変数の依存性としてのみ現れており、線形回帰の方程式を書き下す際には全ての熱力学変数の時間発展を一貫した論理から決定している。しかも、これは一般的な連続体に対して適用可能な普遍的な枠組みであり、様々な種類の連続体力学に適用できる。これらの点から、この研究は非平衡熱力学の連続体力学への応用に関して新たな理解をもたらした重要な研究であるといえる。

さらに、本申請論文で議論されているエントロピー汎関数は、非平衡状態にある連続体のエントロピーの値を局所的な汎関数として評価するものだが、このような汎関数はこれまでに提案されておらず、連続体の非平衡エントロピーの値を知るには非常に便利な汎関数である。特に、いわゆる流体/重力対応の枠組みで粘性流体と非平衡ブラックホールの間の対応を考える際には、粘性流体のエントロピー汎関数は、対応する非平衡ブラックホールのエントロピーの値に一致すると期待され、この方向性での更なる研究が期待される。

次に、相対論的粘弾性体力学の研究に関して、この研究は既存の非相対論的粘弾性体力学のモデルを一般共変な形に一般化し、その性質を調べたものである。特に、このモデルのパラメータを様々な値に選ぶことで、弾性体や流体や粘弾性体の様々なモデルに加えて simplified Israel-Stewart モデルなども統一的に記述できることが確認された。さらに、この粘弾性体モデルは広いパラメータ領域で双曲型の発展方程式を与えるモデルであることが確認され、この結果から、因果律を破るような流体の振る舞いを修正する手法として、弾性的な歪みの効果を考慮に入れるというアプローチが有効であることが明らかになった。また、重イオン衝突実験などにおける相対論的な運動をする連続体を考える際には、物質の弾性的な振る舞いについても考察することが重要になるのではないかという新たな示唆も得られた。今後、このような視点に基づいて重イオン衝突実験の現象論が発展することが期待される。

以上のように、本申請論文は、物質場の非平衡熱力学に関する理解を深めたことに加えて、様々な連続体を普遍的に記述する粘弾性体理論を構築した。特に、この粘弾性体モデルは双曲型の発展方程式を与えるため、重イオン衝突実験などにおける数値シミュレーションへの応用なども期待される。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月18日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降