

氏名	つじね なる 辻根 成
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	富理工博甲第169号
学位授与年月日	令和2年3月24日
専攻名	数理・ヒューマンシステム科学専攻
学位授与の要件	富山大学学位規則第3条第3項該当
学位論文題目	Vlasov コードによる接触不連続に関するシミュレーション研究 (Simulation study on contact discontinuities with Vlasov codes)
論文審査委員 (委員長)	長谷川 英之 廣林 茂樹 伊藤 弘昭 佐藤 雅弘 梅田 隆行

## 学位論文の要旨

学位論文題目 Vlasov コードによる接触不連続に関するシミュレーション研究

数理・ヒューマンシステム科学専攻

氏名 辻根 成

接触不連続は磁気流体力学において、異なるプラズマ密度と温度を分ける不連続面(境界層)であり、不連続面の法線方向の速度変化および磁場変化がなく、圧力が一定である。境界層を挟んだ領域 1 と 2 における物理量の関係は磁気流体方程式から導かれるジャンプ条件により記述される。接触不連続は運動論における安定性が長らく議論されている。ここで、接触不連続が維持するとは、その数密度の不連続面が崩れず長時間残り続けることである。本研究は、磁気流体方程式により導出される接触不連続を運動論方程式が用いられる Vlasov コードによってシミュレーションするものである。

第一に、運動論方程式から流体方程式を経由して接触不連続の導出を行う。本研究において、運動論方程式によるシミュレーション手法を用いて、流体方程式の不連続解として知られる接触不連続の研究を行うため、これらの関係性を明らかにした。運動論における接触不連続のシミュレーション研究では、これまで full-Particle-In-Cell (PIC) 法、hybrid-PIC 法と full-Vlasov 法が用いられてきた。運動論シミュレーションの研究において、しばしば PIC 法が用いられるが、粒子に起因するノイズが含まれる。本研究において、接触不連続の構造を高精度に観測するために粒子によるノイズがない Vlasov 法を用いた。特に、静電 hybrid-Vlasov シミュレーションは計算例が少ないため、静電 hybrid-Vlasov シミュレーションに用いる方程式の分散関係より、コードの性能を確かめた。

第二に、衛星観測により得られたデータに基づく初期値を用いて、full-Vlasov シミュレーションを行い、初期の電子とイオンの温度に対して温度依存性を詳細に解析した。その結果、電子時間スケールで一様な全圧を形成するためには、Tsai *et al.* の条件を用いるのではなく、領域 1 と 2 における電子温度をほとんど

ど一様とする必要があることがわかった。つまり、この結果は先行研究の結果を修正するものである。また、衛星観測により得られたデータの温度比を含む、様々に変化させた全ての温度比において、イオン数密度の遷移層は広がるため、不連続面は維持しないということがわかった。すなわち、電子時間スケールにおいて全圧が一様であったとしても不連続面は維持しない。さらに、Tsai *et al.* の条件の導出を再考したところ、運動論的な平衡解を満たすには温度を一様とする必要があることがわかった。ただし、温度が一様であったとしても、初期に静電ポテンシャルの変化を仮定しない場合、イオン数密度は不連続ではないこともわかった。

第三に、接触不連続の安定性を研究するために観測データに基づく初期値を用いた一次元の静電 hybrid- と full-Vlasov シミュレーションを行った。静電 hybrid-Vlasov シミュレーションではイオン数密度のシャープな勾配は早い段階で形成され、その後長い期間維持される。しかし、このシャープな勾配は静電 full-Vlasov シミュレーションでは存在しない。一般化 Ohm の法則は静電 hybrid- と full-Vlasov 両方のシミュレーションにおいて、イオン時間スケールで電子圧力勾配によって電場をサポートすることを示している。静電 hybrid- と full-Vlasov シミュレーションの間で電子圧力の時間発展の違いがあること、そして、その原因は主に電子ヒートフラックスによることが示された。

## 【学位論文審査結果の要旨】

当博士學位論文審査委員会は、当該論文を詳細に査読し、かつ公開による論文発表会を令和2年2月10日（月）に実施し、詳細な質疑と応答ならびに最終審査を行った。以下に審査結果を要約する。

プラズマ中の接触不連続は磁気流体力学において異なるプラズマ密度と温度を分ける不連続面（境界層）であり、不連続面の法線方向の速度変化および磁場変化がなく、圧力が一定である。これまで、流体方程式から導出される接触不連続に対して、運動論的方程式を用いたシミュレーションが行われてきた。イオンを運動論、電子を流体として記述する hybrid-Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションにおいて、イオン数密度の不連続面が維持することが示された。一方で、イオンと電子共に運動論として記述する full-PIC シミュレーションにおいては、イオン数密度の不連続面は維持しないことが示された。すなわち、これらのシミュレーション結果には差異があるため、運動論において不連続構造が安定するかどうかの議論が続いている。また、観測衛星 THEMIS により太陽風中の接触不連続の存在が報告された。

本論文において、既存の PIC 法による数値ノイズを含まない、（速度—位置）位相空間におけるプラズマ分布関数を直接的に取り扱う Vlasov シミュレーションが行われた。イオン時間スケールまで解く場合、空間1次元速度1成分（静電近似）であっても計算コストが非常に高く、並列計算の導入も必要とされる。近似による接触不連続の物理の違いを議論するために、通常の full-Vlasov に加えて、hybrid-Vlasov コードも独自に導入している。一般に、hybrid シミュレーションではイオンの運動に合わせて時空間の刻みを大きくすることで計算コストを低減できるが、本論文においては直接比較のため、静電 hybrid-Vlasov シミュレーションの刻みを full-Vlasov のものと一致させている。

本論文は、主に以下2つの内容から構成されている。

第一に、衛星観測データに基づく初期値を用いて、不連続を隔てた両側領域の温度比を様々に変えて、イオン時間スケールまで静電 full-Vlasov シミュレーションを行った。これまで、電子時間スケールで一様な全圧を形成するために、不連続面を挟んで圧力と温度分布が逆関係になるという条件が提案されていたが、これは適切ではなく、両領域の電子温度がほとんど等しくあれば良いということを見出した。また、どの温度比を用いたとしても、イオン数密度の遷移層は時間と共に広がることを示した。すなわち、電子時間スケールにおいて全圧が一様であったとしても不連続面は維持しないということを明らかにした。

第二に、静電 hybrid- および full-Vlasov コードの両方を用いて、接触不連続のシミュレーションを行い、両者の結果を詳細に比較した。静電 hybrid-Vlasov シミュレーションの場合、イオン数密度のシャープな勾配が早い段階で形成され、イオン時間スケールまで維持される。しかし、この

シャープな勾配は静電 full-Vlasov シミュレーションでは現れない。このイオン数密度の構造に電場が関係していることから、運動論における接触不連続を対象として初めて一般化 Ohm の法則を導入した。Vlasov コードを用いていることもあり、一般化 Ohm の法則における電場の成分をクリアに示すことに成功している。その結果、両方のシミュレーションにおいて、電場の形成に違いがあるにもかかわらず、電子圧力勾配がイオン時間スケールで電場をサポートしていることを示した。電子圧力の時間発展の様子は異なっており、この違いは主に電子ヒートフラックスによるものであることを明らかにした。

以上のように本研究は、運動論における接触不連続の安定性に関する問題に貢献するものであり、高い学術的価値が認められる。したがって、当博士論文審査委員会は本申請論文が博士（工学）の学位を授与するに値するものと認め、合格と判定した。