

Title	荷電粒子多体系におけるリアプノフ指数と巨視現象に関する理論的研究
Author(s)	上島, 豊
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3129078">https://doi.org/10.11501/3129078</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	うえしま ゆたか 上 島 豊
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 13179 号
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科電磁エネルギー工学専攻
学位論文名	荷電粒子多体系におけるリアプノフ指数と巨視現象に関する理論的研究
論文審査委員	(主査) 教授 西原 功修 教授 三間 罔興 教授 権田 俊一 教授 中井 貞雄 教授 西川 雅弘 教授 飯田 敏行 教授 堀池 寛

### 論文内容の要旨

本論文は、荷電粒子多体系における位相空間の軌道不安定性の成長率、すなわちリアプノフ (Lyapunov) 指数と巨視現象との関係などに関する理論的研究の成果をまとめたもので、6章から構成されている。

第1章では、リアプノフ指数と巨視現象との関係について述べ、本研究の位置づけと本論文の目的を示している。

第2章では、個々の粒子間力を取り入れた高密度プラズマ粒子コード“SCOPE”について説明し、そのコードがクーロン相互作用の長距離性と粒子相関を正しく取り扱っていることを明らかにしている。

第3章では、1成分強結合プラズマ中の剪断流不安定性について粒子シミュレーションを行い、微視的観点から流体力学的不安定性の非線形成長を明らかにしている。また、不安定性の非線形発展で生じる渦の自己組織化について、遠心力と電場との釣り合いで大きな渦が形成されることを見出ししている。

第4章では、多体系の位相空間軌道不安定性と統計力学のエルゴード性との関係について述べ、粒子シミュレーションにおけるリアプノフ指数の計測方法を示している。また、局所リアプノフ指数を観測し、その時間変化の特性を明らかにしている。

第5章では、粒子シミュレーションにより、希薄プラズマ、強結合液相プラズマ、固相プラズマの各相で、リアプノフ指数が異なるイオン結合定数依存性を有することを示している。また、希薄プラズマの領域で、第一原理に基づきリアプノフ指数を解析的に求める理論モデルを構築し、その結果と粒子シミュレーションの結果を比較している。さらに、その関係を一般化し、リアプノフ指数と誘電応答関数との関係を明らかにしている。強結合プラズマ領域での結果についても理論的検討を加え、また、輸送係数とリアプノフ指数との関係を明らかにしている。

第6章では、本研究において得られた結果をまとめ、総括を行っている。

### 論文審査の結果の要旨

近年、統計力学におけるエルゴード性とも関連して、位相空間での粒子軌道不安定性の成長率、すなわちリアプノフ (Lyapunov) 指数と巨視現象との関係を明らかにする試みがなされている。しかしながら、これまでの研究は短距離力や少数自由度系に限られており、本質的な解明はまだなされていない問題である。本論文は、長距離力である

クーロン力多体系，すなわちプラズマを対象として，希薄プラズマ，強結合液相プラズマ，固相プラズマの各相でのリアプノフ指数とイオン結合定数との関係を調べリアプノフ指数と巨視現象との関係を明らかにすることを目的として行った研究をまとめたものである。主な成果を要約すれば次の通りである。

- (1) 個々の粒子間力を計算できる粒子シミュレーションを用いて，プラズマ周波数で規格化したリアプノフ指数のイオン結合定数依存性 ( $\Gamma$ ) が，固相プラズマ ( $\Gamma > 170$ ) では  $\Gamma^{-6/5}$  に比例すること，強結合液相プラズマ ( $1 < \Gamma < 150$ ) では  $\Gamma^{-2/3}$  に比例すること，また，希薄プラズマ ( $\Gamma < 0.05$ ) では  $\Gamma$  に無関係であり，リアプノフ指数がプラズマ周波数程度の大きさになることを定量的に明らかにしている。また，1成分プラズマの相転移 ( $\Gamma \sim 160$ ) に伴い，リアプノフ指数に跳びが存在することを見い出している。
- (2) 固相プラズマ，および液相プラズマについては，それぞれ，非線形格子振動の振動エネルギー，および，剛体荷電球の2体衝突の観点から考察を行い，リアプノフ指数のイオン結合定数依存性を定性的に説明出来ることを示している。
- (3) 希薄プラズマのリアプノフ指数が，プラズマの集団的性質に伴うプラズマ周波数程度になることに着目し，希薄プラズマのリアプノフ指数を第1原理に基づき導出する理論モデルを構築している。その結果，リアプノフ指数がプラズマの誘電応答関数から求められることを初めて明らかにしている。また，理論値が定量的にもシミュレーション結果と良く一致することを示している。
- (4) 強結合液相プラズマでのリアプノフ指数が，拡散係数の  $1/3$  乗に比例することを明らかにしている。
- (5) リアプノフ指数の非線形飽和，あるいは時間的に変化する局所リアプノフ指数の遷移過程，間欠性などの性質とイオン結合定数との関係を明らかにしている。
- (6) 強結合プラズマの剪断流不安定性についても，非線形乱流状態が自己組織化により，遠心力と空間電荷に伴う求心電場との釣り合う新しい平衡状態に移行することを示している。

以上のように本論文は，荷電粒子多体系のリアプノフ指数と統計力学物理量との関係を明らかにしたものであり，統計力学，プラズマ物理，複雑性の科学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。