

磁気圏型プラズマにおける 粒子及びエネルギーバランスの評価

学生証番号 47176089 氏名 桂 将太郎
(指導教員 吉田 善章 教授)

Key Words : magnetospheric plasma, up-hill diffusion (inward diffusion), particle balance, energy balance

1. 研究目的と手法

開放系である惑星の磁気圏において、プラズマは自己組織化することで自ら構造を形成し維持している。本研究の目的は、これらの自己組織化するシステムにおける、物質とエネルギーの流れを定量的に評価することである。磁気圏型プラズマの構造形成には、反応素過程に加え、up-hill拡散による粒子移動やそれに伴うベータトロン加熱などの物理現象が重要な役割を担っていることが先行研究により明らかとなっている。本研究では、RT-1実験装置で計測される密度と温度の空間分布に基づき、磁気圏型プラズマにおける物質・エネルギー循環のモデルを構築する。up-hill拡散の効果も考慮に含め、粒子バランスとエネルギーバランスをカップリングさせた非線形の1次元バランスモデルを作成し、計算結果と実験計測を比較することによって、粒子移動速度を定量的に評価した。

2. 実験装置および計測装置

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置RT-1の概略図と計測器及び計測パラメータを図1に示す。

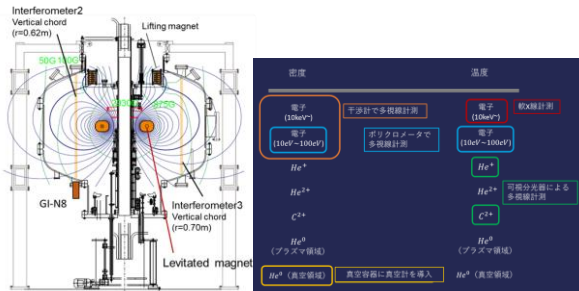


図1. 左図:実験装置RT-1, 右図:計測パラメータと計測器

干渉計による電子密度計測とポリクロメータによる低温電子温度計測及び可視分光器によるHe⁺温度計測は多視線計測することで空間分布を計測している。

3. 実験計測結果

図2に干渉計による電子密度計測信号と反磁性信号, 真空計, ポリクロメータによる低温電子温度の計測波形を示す。

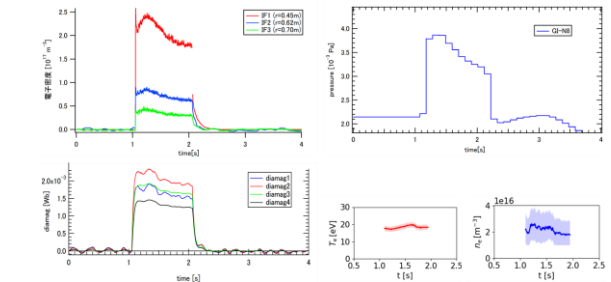


図2 左上:干渉計の計測波形, 右上:真空計の計測波形
左下:反磁性信号の計測波形, 右下:ポリクロメータの計測波形

図2に示したプラズマ放電の, $t=1.2$ sにおける低温電子温度, He⁺温度の計測視線方向分布と, 電子密度の再構成結果を図3に示す。

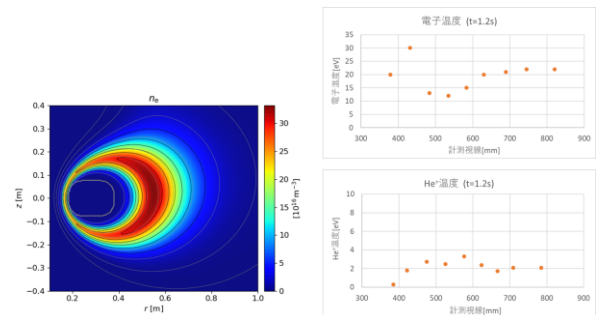


図3 左図:電子密度の再構成結果, 右上:低温電子温度の計測視線分布, 右下:He⁺温度の計測視線分布

Up-hill拡散による粒子移動の観測をするために、プラズマ中にガスパフをする実験を行った。Heガスパフ実験における干渉計の線積分計測値とガスパフ後の0.04秒間の電子密度空間分布の変化を図4に示す。

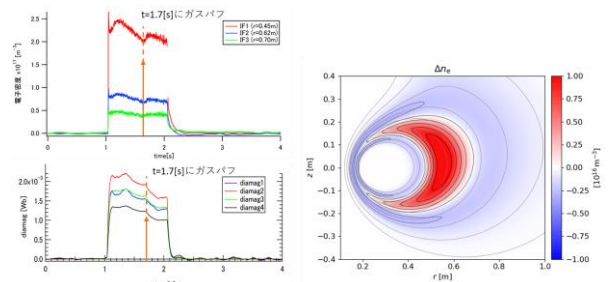


図4 左上:干渉計の計測波形, 左下:反磁性信号の計測波形,
右:電子密度空間分布の変化 ($t=1.75$ s - $t=1.71$ s)

図4に示したガスパフ後の電子密度の空間分布変化を見ると、電子がプラズマ周辺部から中心部へと移動していることがわかり、up-hill拡散による粒子移動が観測された。

4. 1次元粒子・エネルギーバランスモデル

本モデルでは、図5の左図に示すように磁気圏型プラズマを磁気面に沿って4つの領域に分けた。モデル計算の結果と図3に示した実験結果を比較することにより、up-hill拡散によって磁気面を横切り移動する粒子の速度を評価した。

4-1 粒子バランスモデル

粒子バランスの概念図を図5の右図に示す。

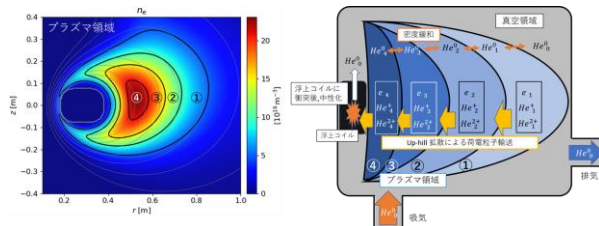


図5. 左図:プラズマ領域の区分, 右図:粒子バランスの概念図

図5の右図に示すように、中性粒子は拡散により隣り合う領域間で密度緩和を起こす。荷電粒子は各領域内では反応素過程を起こしつつ、up-hill拡散によって周辺領域から中心領域へと磁気面を超えて移動する。最も中心の領域にある荷電粒子は、最終的に浮上コイルに衝突することで中性化し、真空領域へ中性粒子として供給される。プラズマ内の中性粒子はイオンと荷電交換反応を起こすことによって、数eVのエネルギーを持った中性粒子となり、プラズマ内から脱する。その後真空容器によって熱緩和され室温での音速レベルのエネルギーを持った中性粒子に戻り、真空領域へ供給される。

4-2 エネルギーバランスモデル

領域内におけるエネルギーバランスモデルの概念図を図6の左図に示す。イオンは低温電子からエネルギー供給を受け、中性粒子と荷電交換反応によってエネルギーを損失する。本エネルギーバランスモデルでは、低温電子温度は定数として、ポリクロメータにより計測された値を用いている。

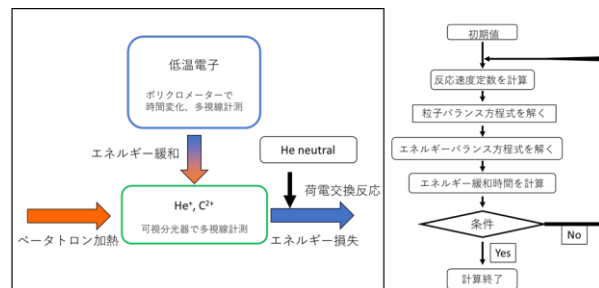


図6. 左図:エネルギーバランスの概念図, 右図:計算手法
モデル計算では、これらの粒子バランスとエネ

ルギーバランスをカップリングさせた非線形方程式を解いている。計算手法を図6の右図に示す。時間発展を解いている全粒子の密度と温度がそれぞれ平衡に達した時点で計算終了となる。

4-3 モデル計算結果

計算に用いた各領域におけるUp-hill拡散による粒子移動の速度と低温電子温度を表1に示す。

表1 各領域における粒子移動速度と低温電子温度

r[mm]	粒子輸送速度[m/s]	低温電子温度[eV]
550	230	15
650	210	20
750	200	20
850	190	20

粒子移動速度は、様々な値を代入し計算結果が実験計測結果を説明しうる値を選んだ。表1の値で計算を行った結果と実験計測結果を図7に示す。

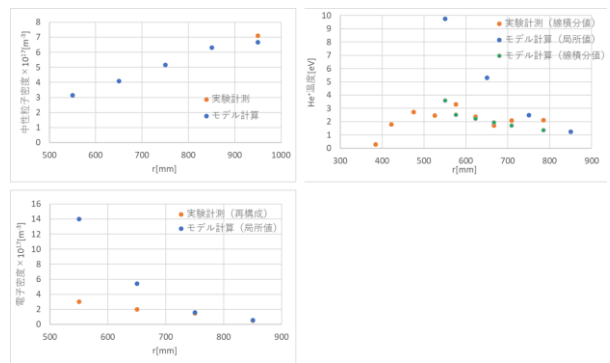


図7. 実験結果と計算結果の比較

(左上:電子密度, 右上:He⁺温度, 左下:中性粒子密度)

電子密度は、プラズマ周辺部ではよく一致しているが、中心部では計算結果の電子密度が高くなった。実験結果は、3視線のみの計測からローカル値を再構成しているため、中心部分において精度が高いとは言えない。磁気圏プラズマは中心部での密度ピークが非常にシャープであるという理論予測もされており、現在開発中のトムソン散乱計測によってローカル値計測を行う必要がある。イオン温度は、計算結果のローカル値を視線積分値に再構成した結果と、実験結果がよく一致している。

5 結論

Up-hill拡散による粒子移動とそれに伴うペータロン加熱を考慮した1次元バランスモデルによって、RT-1の実験で計測された磁気圏型プラズマの構造を説明できた。モデル計算と実験結果の比較により、Up-hill拡散による粒子移動速度は約200m/sであると評価された。モデル計算より求められた電子密度分布はプラズマ中心部で鋭くピーキングしていた。この構造の妥当性を検証するためには、さらに正確な電子密度の局所値計測が必要である。