

# 宇宙プラズマ中の高エネルギー荷電粒子の消失過程

Loss processes of energetic charged particles in space plasma

研究代表者：研究代表者名 田所 裕康（駿河台大学メディア情報学部）  
tadokoro.hiroyasu@surugadai.ac.jp

研究分担者：加藤 雄人（東北大学理学研究科地球物理学専攻）  
yuto.katoh@tohoku.ac.jp

担当：シミュレーション開発、パラメータサーベイ

## 研究目的 (Research Objective):

プラズマ中性粒子間衝突の定量的理解は、宇宙プラズマ素過程の理解としても重要である。その定量的理解のために計算機実験の果たす役割は大きく、これまでに土星磁気圏に着目してこれらの検証を実施してきた。土星磁気圏はエンケラドス衛星起源の水分子(中性)がプラズマよりも高密度に分布しているため、プラズマの消失が支配的な「消失型磁気圏」と言うこともできる。また、Cassini 探査機による観測は土星内部磁気圏のプラズマがエンケラドス衛星起源の中性粒子によって消失している事を定性的に示唆した。本研究では、中世粒子との衝突プロセスに関して定量評価がほとんどなされていない電子に着目する。電子のエネルギーに応じて、支配的な衝突プロセスが弾性衝突になったりイオン化衝突になったりする。これら個々の衝突プロセスを切り分けて検証できるのが数値実験の強みであり、電子と水分子の弾性衝突の定量評価がされている [Tadokoro and Katoh, 2014, JGR]。イオン化衝突に関しては未検証であったため本年度は以下の点を具体的な目的と設定する。

[A] イオン化反応のコード実装

[B] イオン化反応を通じた電子エネルギー消失の定量評価

[A] に関しては、イオン化反応により生成する 2 次電子による 1 次電子のエネルギー消失の効果をコードに実装する。[B] に関しては、1keV 電子と水分子のイオン化反応の計算を実施し、1keV 電子のエネルギー消失に関して初期結果を示す。

## 計算手法 (Computational Aspects):

土星磁気圏において最も中性水分子が高密度であるエンケラドス衛星付近の磁力線に沿った空間 1 次元におけるテスト粒子シミュレーションを行う [Tadokoro and Katoh, 2014, JGR]。基礎方程式は以下のようなになる。

$$m \frac{dv}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

ただし、電場  $\vec{E}$  は 0 と仮定している。磁場  $\vec{B}$  はダイポール磁場を仮定する。境界条件として、磁気緯度  $\pm 10$  度以内のシミュレーション空間で考える。計算時間は、共回転を

仮定した電子フラックスチューブがエンケラドス衛星周辺の高密度領域を通過する 6.4 分(380 秒)間としている。また初期ピッチ角分布は、ピッチ角変動を評価するため、等方分布を仮定する。計算粒子数は 500,000 とする。中性水分子との衝突過程は衝突確率として、以下のように表すことができる。

$$P = n\sigma_{ion}v\Delta t, \quad (2)$$

$n$  は中性水分子密度である。 $\sigma_{ion}$  はイオン化衝突断面積 [Itikawa and Mason, 2005] となる。 $v$  は電子と H<sub>2</sub>O の相対速度であるが、電子速度で近似している。中性水分子密度は背景パラメータとして固定し、Cassini 探査機による観測結果 [Smith et al., 2009] に合うようにモデル化した値を用いる。時間ステップ  $\Delta t$  毎に衝突の有無を (2) 式によって判定する。衝突しなければ次の時間ステップに進める。本研究で扱うイオン化反応は  $e(1st) + H_2O \rightarrow e(1st) + e(2nd) + H_2O^+$  である。1st は 1 次電子、2nd は 2 次電子を示しており、運動を追跡するのは 1 次電子のみである。1 回のイオン化衝突によって、1 次電子は 12.6eV のイオン化エネルギーと生成された 2 次電子のエネルギーを消失する。2 次電子の生成エネルギーは Singly Differential Cross Section (SDCS) の実験値を用いる [Itikawa and Mason, 2005]。電子散乱は未実装である。

以上のような手法によって、MPI を用いた並列計算を実施する。計算機資源の制約のため、単一エネルギーの電子 (本研究では 1keV 電子) に着目して計算を実施していく。

## 研究成果 (Accomplishments) :

計算手法で述べた 2 次電子による 1 次電子のエネルギー消失の効果をコードに実装した。図にイオン化反応を通した 1keV 電子のエネルギー消失の時間発展の計算結果を示す。横軸は電子エネルギー、縦軸は規格化された粒子数(初期値の 1keV 電子の数を 1 として規格化)を示している。本研究では、1keV 電子の時間発展に着目しているため、初期(0 秒)分布は 1keV 電子のみが(規格化した電子数 1 で)分布していることになる。色の違いは時間経過(60 秒~380 秒)を示している。時間発展とともに、イオン化反応によって電子エネルギーが消失している様子(低エネルギー電子の数が増加している様子)がわかる。60 秒で 1keV 電子の初期分布の 9%程度がエネルギー消失していることがわかった。また計算終了時刻として設定した 380 秒においては、1keV 電子の初期分布の 72%がエネルギー消失していることがわかった。前年度(2020 年度)実施した計算においては、2 次電子の効果を未実装であった(2 次電子の効果を実装しない場合、60 秒で 3%程度、380 秒で 54%程度の電子が消失していた)。2 次電子を考慮することによって 1.3 倍程度の

電子数がエネルギー消失を受けていることを示した。

今後の展開として、さらなる解析（例：どの程度のエネルギーを消失したのかの定量解析）とともに、他のイオン化消失過程（今回着目した $\overline{H_2O^+}$ 以外の生成イオンの反応の考慮）のコードへの実装を実施していく。

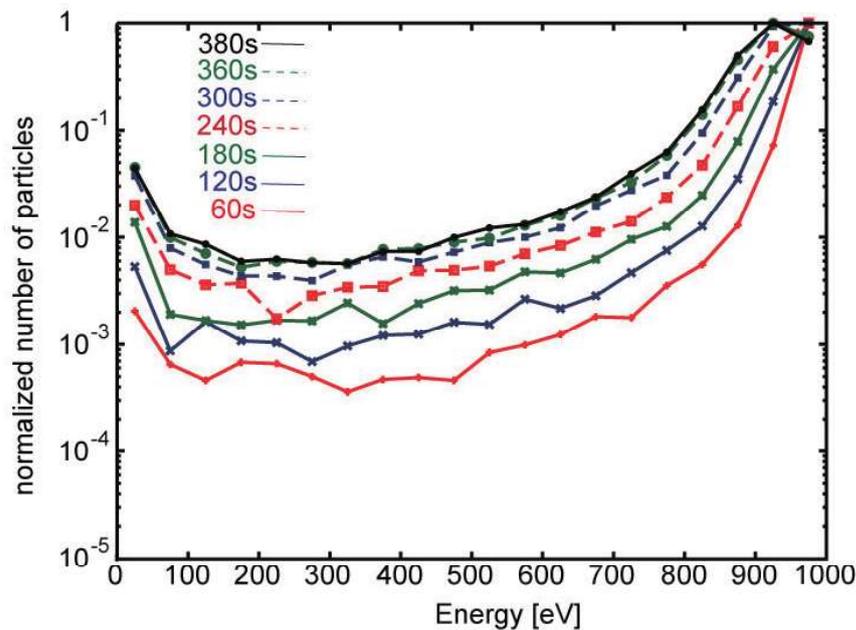


図 イオン化衝突による 1keV 電子のエネルギー消失の時間発展

#### 公表状況 (Publications) :

##### (査読無し論文)

1. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Test particle simulation of electron energy loss by ionization around Enceladus -Initial result-, Proceedings of Symposium on Planetary Science 2021, 2021.

([http://pparc.tohoku.ac.jp/sympo/sps/proc/2021/SPS2021\\_P25\\_Tadokoro.pdf](http://pparc.tohoku.ac.jp/sympo/sps/proc/2021/SPS2021_P25_Tadokoro.pdf))

##### (学会発表)

1. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Numerical simulations of 500eV-50keV electron elastic collisions with neutral  $H_2O$  around Enceladus -estimation of electron loss rate and auroral brightness-, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月
2. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Test particle simulation of 1keV electron energy loss by ionization with water molecule around Enceladus, 第 23 回惑星圏研究会, 2022 年 2 月.