

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：田所 裕康 (東北学院大学情報学部データサイエンス学科)

研究分担者：加藤 雄人 (東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻)

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):

宇宙プラズマにおける電子と中性粒子の相互作用の理解は、惑星磁気圏のダイナミクスを理解する上で重要である。また、これらの定量的理解において計算機実験の果たす役割は大きい。本研究課題では、これまで土星磁気圏を対象として電子と中性粒子との相互作用を通じた磁気圏電子の挙動について数値実験により検討を進めてきた。土星では、カッシーニ探査機の観測により、エンケラドス衛星を起源とする水分子(中性)がプラズマよりも高密度に存在していることが明らかとなっている。このため、土星磁気圏はプラズマの消失が支配的となる「消失型磁気圏」として特徴づけることができる。本研究では、これまで定量評価が十分になされていない電子に着目し、中性粒子との衝突過程を詳しく調査する。一般に、電子と中性粒子の衝突では、電子エネルギーに応じて支配的な衝突プロセスが変化し、1keV 程度以下では弾性衝突、1keV 程度以上ではイオン化反応が主となる。これら個別の衝突プロセスを切り分けて検証できる点は、数値実験の大きな利点である。これまでに、電子と中性粒子の相互作用の定量的理解に向けた第一段階として、500eV から 50keV の電子の弾性衝突散乱に着目した数値実験を実施してきた(1keV 電子と水分子の弾性衝突に関する定量評価については *Tadokoro and Katoh* [2014] を参照)。前年度に弾性衝突による電子消失を定量的に評価する一環として、土星大気へのエネルギー流入量を算出した。その結果、本来はどこかでピークを持つと考えられるエネルギー流入量が、電子エネルギーの増加に伴って単調に増大するという傾向が確認された。この要因として、1keV 以上の弾性衝突に対して、1keV における弾性散乱断面積モデルをそのまま適用していたことが影響していることが明らかとなった。一方、イオン化反応に関しては、これまでに衝突断面積モデルの構築を進めてきた。

本年はこれらを踏まえて、「弾性衝突散乱断面積モデルのアップデートとそれに伴う弾性衝突による電子消失の再計算」を主目的として、「イオン化反応により生成する2次電子エネルギーの1次電子エネルギーに依存したモデルの検証」に関しても継続していく。

計算手法 (Computational Aspects):

土星磁気圏において中性水分子密度が最も高いエンケラドス衛星近傍の磁力線に沿った1次元空間を計算領域として設定する。本研究では、モンテカルロ法を用いた

1次元テスト粒子シミュレーションを実施する[Tadokoro and Katoh, 2014, JGR]。相対論効果を考慮した基礎方程式は、以下のようになる。

$$\frac{d}{dt}(m_0\gamma\vec{v}) = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

ただし、電場 $\vec{E}$ は0、磁場 $\vec{B}$ はダイポール磁場を仮定している。境界条件としては、磁気緯度 ± 10 度の範囲として設定する。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約6.4分(380秒)とする。また初期ピッチ角分布は、ピッチ角変動を評価するため、等方分布を仮定し、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、以下のように表示することができる。

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

n は中性水分子密度は背景値として一定とする。 σ_{tot} は衝突断面積であり、弾性衝突、イオン化衝突ごとに値は異なる[Itikawa and Mason, 2005]。各時間ステップ Δt 毎に衝突の有無を(2)式によって判定する。衝突が発生しない場合は次の時間ステップへ進む。衝突が発生する場合にはピッチ角散乱が起これ、その散乱角は微分散乱断面積に基づきモンテカルロ法で決定する。一方、イオン化反応では、1次電子はイオン化エネルギー(12.6eV)および2次電子のエネルギー分のエネルギーを消失する。2次電子の生成エネルギーには、Singly Differential Cross Section(SDCS)の実験値を用いる[Itikawa and Mason, 2005]。現状では、イオン化衝突における断面積モデルとして、1次電子のエネルギーを1keVに固定して2次電子の生成エネルギー(微分散乱断面積)を評価している。しかし実際には、衝突が発生するたびに1次電子のエネルギーは消失するため、このエネルギー変化を反映した2次電子生成エネルギーのモデル化が必要である。現状、この点について検討を進めている。また、イオン化反応における電子の散乱課程については現時点では未実装である。

研究成果 (Accomplishments) :

2025年度は弾性衝突の評価を主目的にして以下の成果を得た。
まず弾性衝突についてはこれまでA-KDKを用いた数値実験により、500eV-50keVの磁気圏電子と水分子との弾性衝突による電子消失の定量評価を行ってきたが、1keV以上の電子に対する微分散乱断面積の実験データの不足により、1keV電子のデータをそのまま適用していた。この適用は、高エネルギー電子ほど前方散乱が卓越するという傾向を十分に反映しておらず(後方散乱の効果が残る)、大気へのエネルギー流入量を過大評価している可能性があった。この点を改善するため、2025年度は500eVから1keVの実験データ[Katase et al., 1986]をもとに、高エネルギー領域への補間を実施

し微分散乱断面積モデルの再構築を行なった。スプライン補間を用いたところ、不自然な増減を示す箇所が生じたため、最終的には線形補間を採用した。更新した断面積モデルを用いて再度数値実験を行なった結果、依然として電子消失率を過大評価している傾向が確認された。この原因を調査したところ、高エネルギー領域においても（補間法を用いただけでは）後方散乱成分が完全に除去されていないことが判明した。今後は後方散乱の寄与を適切に低減するための更なるモデルの改良が必要であることを示した。現在 Lummerzheim et al., 1989 の微分散乱断面積のモデルを 1keV 以上に適用することを検討中である。

一方、イオン化反応については、1 次電子のエネルギーを考慮したイオン化衝突モデルの検討を引き続き実施した。これまでにラグランジュ補間やスプライン補間を導入して検討したが、いずれも不自然な挙動が見られることが判明した。補間法だけを用いたモデルでは適切なモデルを構築することが困難であることが分かった。

公表状況 (Publications) :

(学会発表)

1. 田所裕康, 加藤雄人, アップデートした弾性衝突モデルを用いたエンケラドス衛星起源の水分子による keV 電子弾性衝突のテスト粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 2025 年 5 月.
2. Tadokoro, H., and Y. Katoh, A test particle simulation for re-evaluation the energy input into the Saturn's atmosphere by keV electrons, 第 158 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 兵庫県神戸市, 2025 年 11 月.
3. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Improvement of the elastic collision model for test particle simulations of keV electron-water molecule interaction around Enceladus, 第 27 回惑星圏研究会, 2026 年 3 月.