

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 (千葉経済大学 経済学部)
h-tadokoro@cku.ac.jp

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)
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は、宇宙プラズマ素過程の定量的理解において重要であるとともに、その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、中性粒子による磁気圏電子の振る舞いを議論してきた。土星磁気圏は、カッシーニ探査機の観測結果から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。本研究では、中性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。一般に電子-中性粒子間衝突は、電子のエネルギーに応じて、支配的な衝突プロセスが変わる(1keV以下では弾性衝突、1keV以上ではイオン化反応)。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、これまでに1keV電子と水分子の弾性衝突の定量評価がなされている[Tadokoro and Katoh, 2014, JGR]。またKDKを用いて2021年までに500eV-50keV電子と水分子の弾性衝突の計算を終えている。本年はこれらの計算結果を用いて、

1) 弾性衝突散乱によってピッチ角散乱された降下電子によるオーロラ発光強度の見積りを行うことを目指す。

また、イオン化反応に関しては、これまでに1keV電子のエネルギー消失率の初期結果を示している。しかしながら、これらの計算結果は、2次電子の生成エネルギー(微分断面積)を1次電子のエネルギーが1keVであると仮定して計算している。実際は衝突が発生する毎に1次電子のエネルギーは消失を受けていくため、これら1次電子エネルギーを反映した2次電子生成エネルギーのモデル化が必要となる。そこで、

2) 1次電子のエネルギーを考慮した2次電子生成エネルギーのモデル化の検討を目指す。

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]. 相対論効果を含めた基礎方程式は、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と仮定している。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、磁気緯度 ± 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、以下のよう表すことができる。

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

n は中性水分子密度(背景値として固定)である。 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]。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。衝突しなければ次の時間ステップに進める。衝突が発生する場合、弾性衝突の場合はピッチ角散乱が発生するがその時の散乱角は実験値をもとにモンテカルロ法を用いて解く。イオン化反応に関しては、反応後1次電子は、イオン化エネルギー(12.6eV)と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はSingly Differential Cross Section(SDCS)の実験値を用いる[Itikawa and Mason, 2005]。イオン化反応における電子散乱は未実装である。

研究成果 (Accomplishments) :

弾性衝突とイオン化反応に関して、以下の2点に関して進めていった。

1) 弾性衝突を起因とした降下電子によるオーロラ発光強度の再評価

これまでにKDKを用いて、500eV-50keVの磁気圏電子と水分子間の弾性衝突を通じたピッチ角散乱による電子消失率の評価を行ってきた。これら消失率を用いることによってオーロラ発光強度の見積りを行った(これまでは1keV電子の観測結果のみを用いて議論してきたため、より実パラメータを用いて再評価した)。入力値は、計算されたエネルギー依存電子消失率、磁気圏電子フラックス(Cravens et al., 2011の観測結果をもとにモデル化)を用いて、エネルギー依存したオーロラ発光強度を得た(降下電子によるエネルギーからオーロラ発光強度への変換はWaite et al. [1983]を用いた)。結果として、500eV-50keV電子において2.6[R]というオーロラ発光強度を定量的に見積もることができた。

2) イオン化衝突の微分断面積のモデル化検討

これまでの計算では、1次電子のエネルギーを1keVと仮定して2次電子の生成エネルギーを解いてきた。実際には1次電子のエネルギーはイオン化反応を発生する毎に減少していくためこれらを考慮した微分断面積を用いる必要がある。本年度は、直線補間を最初に実施したが、実験値とのずれが非常に大きくなることが判明した。次にスプライン補間を用いた微分断面積のモデル化を行った。今後の課題として、これ

らのモデルの妥当性の検証を実施し、イオン化反応による電子消失率の計算機実験を実施していく予定である。

公表状況 (Publications) :

(査読無し論文)

1. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Test particle simulation of 1keV electron energy loss by ionization with water molecule around Enceladus, Proceedings of Symposium on Planetary Science 2022, 2022.

(学会発表)

1. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Numerical simulations of 1keV electron energy loss by ionization with neutral H₂O around Enceladus, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 千葉県, 2022 年 5 月
2. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Test particle simulation of electron – water molecule ionization around Enceladus: energy loss of 1keV electrons, 第 152 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 神奈川県, 2022 年 11 月
3. Tadokoro, H., and Y. Katoh, Energetic electron collisions with water molecules: elastic collision and ionization in the magnetosphere at the orbit of Enceladus, 第 24 回惑星圏研究会, 2023 年 2 月.