

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、エンケラドス衛星起源の中性粒子密度がプラズマ密度の数十倍以上存在している。特に本研究課題で着目している高エネルギー電子(keV 以上)に関しては、内部磁気圏へのインジェクション時においてもフラックス量が減衰していることが観測されている。このように観測面からも土星磁気圏はプラズマ消失が激しい「消失型磁気圏」と言うこともできる。エンケラドス衛星軌道付近では電子フラックス減少が複数例観測されている(例: *Krupp et al.*, 2012 など)。このような電子フラックス減少はエンケラドス衛星表面による消失だけでは説明できていない。衛星以外の電子フラックス消失の候補としては、ダストや中性粒子との相互作用が考えられているが定量的評価は十分であるとは言えない。本研究課題では中性粒子による電子消失の定量評価を目的として数値計算を行ってきた。数値実験の強みとして電子-中性粒子相互作用の個々のプロセス(弾性衝突、イオン化反応など)に切り分けて定量評価ができる、という点がある。しかし、これらの定量的評価はほとんどなされてこなかった。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 500eV-50keV 電子と水分子の弾性衝突の計算を終えている。本年度は、これらの計算結果を用いて「keV 帯電子と水分子との弾性衝突による電子消失の定量評価と課題点の検証」、「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妥当性の検証」を実施した。

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。

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

計算は共回転系で実施しており、また電場擾乱は無視するたね、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。弾性衝突による散乱角は実験データを用いるが、電子エネルギーが1keV以上になると実験データが存在しない。そのため、それ以上の電子エネルギーに対しては1keV電子の実験データで代用している。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。

○keV帯電子と水分子との弾性衝突による電子消失の定量評価と課題点の検証
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、500eV-50keV電子においてオーロラ発光強度は2.6Rであるということを見積った。発光強度を導出するため、計算された電子エネルギーに依存した電子消失率、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、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)。また、電子エネルギーごとのオーロラ発光強度を新たに明らかにした。結果として、電子エネルギーの増加とともにオーロラ発光強度も増加することがわかった。これらの結果から、オーロラ発光強度のピークとなる電子エネルギーを調査する必要性が生じた。そのため、より高エネルギー電子に関する計算を実施していく予定である。

○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

たモデルの妥当性の検証

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。昨年度に続き本年度も補間法の検討を実施した。本年度はラグランジュ補間を検討した。ラグランジュ補間を10次の項まで検討したが、発散してしまい妥当な補間法ではないことがわかった。前年度までに行ってきたスプライン補間を導入することを検討中である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Effect of the mirror force on the collision rate due to energetic electron precipitation: Monte Carlo simulations, Katoh, Y., P. S. Rosendahl, Y. Ogawa, Y. Hiraki, and H. Tadokoro H, Earth, Planets and Space,75, 2023.
2. Energetic electron collisions with water molecules: elastic collision and ionization in the magnetosphere at the orbit of Enceladus, Tadokoro H. and Y. Katoh, Proceedings of Symposium on Planetary Science 2023, 2023.

(学会発表)

1. Effect of the mirror force on the collision rate due to relativistic electron precipitation, Katoh, Y., P. S. Rosendahl, Y. Ogawa, Y. Hiraki, and H. Tadokoro H, AGU Fall Meeting 2023, San Francisco, 11-15 December 2023
2. 田所裕康, 加藤雄人, エンケラドス衛星周辺におけるイオン化反応による電子エネルギー消失に関するテスト粒子シミュレーション: エネルギー依存イオン化衝突断面積のモデル, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 千葉県, 2023 年 5 月