

# Test-particle simulation of electron scattering in Saturn's inner magnetosphere due to neutral H<sub>2</sub>O originating from Enceladus

田所裕康<sup>1</sup> and 加藤雄人<sup>1</sup>  
(Hiroyasu Tadokoro<sup>1</sup> and Yuto Katoh<sup>1</sup>)  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Tohoku University  
E-mail: tado@stpp.gp.tohoku.ac.jp

## 1 はじめに

土星磁気圏は中性粒子密度がプラズマ密度の数十倍以上という中性粒子に支配された磁気圏である[e.g., Richardson, 1998]。Cassini 探査機は Enceladus 衛星南極から大量に放出している H<sub>2</sub>O (plume) を発見した[Porco et al., 2006]。また、近年 Enceladus 衛星を起源とした footprint オーロラが観測された[Pryor et al., 2011]。オーロラ降下電子発生要因は、一般的に沿磁力線方向の加速[e.g., Morioka et al., 2012]、ピッチ角散乱[e.g., Villalon et al., 1995; Newell et al., 2009]の2つに大別される。Pryor et al. [2011] による電子・イオンの観測結果は、沿磁力線方向の分布を示した。一方でピッチ角散乱による大気への電子降下もオーロラを発光させるプロセスであり、その定量評価は行われていない。つまり、支配的な物理機構を同定するためにも各物理機構の定量評価は必須である。

本研究では、ピッチ角散乱を引き起こす機構として電子—中性粒子衝突というこれまで注目されてこなかった機構に注目する。中性粒子との衝突によるピッチ角散乱は地球や木星では中性粒子が低密度であるためマイナーな物理機構であると考えられているが、中性粒子密度が支配的である土星磁気圏においては重要な物理機構であると考えられる。しかしながら、その定量評価は未だ着手されていない。これらの背景から本研究では、テスト粒子シミュレーション手法を用いて、「電子—H<sub>2</sub>O 分子衝突を通じたピッチ角散乱による Enceladus footprint オーロラ発光強度の定量評価」を目的とし、今回はシミュレーションの開発状況を述べる。

## 2 ライフタイムの見積もり

シミュレーション開発前に、電子—H<sub>2</sub>O 衝突のライフタイムの見積もりを行った。ライフタイムは衝突周波数の逆数として、以下の様に表される。

$$lifetime = 1/n\sigma v$$

n は H<sub>2</sub>O 密度[cm<sup>3</sup>]、σは衝突断面積[cm<sup>2</sup>]、v は相対速度[cm/sec]である。ここで、100eV の電子が一度の衝突で 90 度の角度散乱を引き起こす場合を考えると、10 - 10<sup>4</sup> [sec]となった(H<sub>2</sub>O 密度を 10<sup>5-8</sup> [cm<sup>3</sup>][e.g., Smith et al., 2010]、衝突断面積を 10<sup>-18</sup> [cm<sup>2</sup>][Sobrinho et al., 2004]とおいた)。これは Enceladus の公転周期~10<sup>5</sup> [sec]に比べてもかなり早い時間スケールである。また、一般的

に大角度散乱よりも小角度散乱はオーダーで衝突断面積に差が出るため、より早い時間スケールでの衝突が発生すると考えられる。

### 3 1次元テスト粒子シミュレーション開発状況

シミュレーション空間は土星と Enceladus の磁力線の 1 次元空間を考える。磁場はダイポールと仮定する (図 1、z 方向は  $c/\Omega_e$  で規格化)。また、磁気緯度  $\pm 20$  度の範囲をシミュレーション空間とする。これは、 $20$  度以上の高緯度では Enceladus 公転周期程度の時間スケールでは  $H_2O$  と無衝突であると仮定できるためである。

図 1 の磁場に従って電子は下記のように運動方程式に従う、

$$m \, dv/dt = q(\vec{E} + v \times \vec{B})$$

ただし、電場  $E$  は  $0$  とする。電子温度の分布は loss cone Maxwell 分布に従うとした[e.g., Ashour-Abdalla and Kennel, 1978]。

$$f(v_{\parallel}, v_{\perp}) = C \exp(-v_{\parallel}^2/2V_{th,\parallel}^2) g(v_{\perp})$$

$$g(v_{\perp}) = \{1/(1-\beta)\} \{ \exp(-v_{\perp}^2/2V_{th,\perp}^2) - \exp(-v_{\perp}^2/2\beta V_{th,\perp}^2) \}$$

th は熱速度成分、 $v_{\perp}$ 、 $v_{\parallel}$  は磁力線に垂直、平行方向の速度である。 $\beta$  はロスコーンパラメータで  $0.5$  とした。熱速度は  $300\text{eV}$  とした。仮定した初期分布を図 2 に示す。横軸、縦軸は光速で規格化した  $v_{\parallel}$ 、 $v_{\perp}$  である。

また、図 3 に背景の  $H_2O$  密度の分布を示す。衝突断面積は、Sobrinho et al, [2004] の Born 近似による散乱断面積の値を使用する。

図 4 に、本研究の 1 次元テスト粒子シミュレーションのフローチャートを示す。衝突の有無、衝突後の散乱角はモンテカルロ法を用いる。

### 4 まとめ・今後の課題

本研究では、1 次元テスト粒子シミュレーション手法を用いて、「電子- $H_2O$  分子衝突を通じたピッチ角散乱による Enceladus footprint オーロラ発光強度の定量評価」を目的とし、シミュレーションの開発状況を述べた。ライフタイムの見積もりは  $90$  度の大角度散乱で  $10^{14}$  [sec] となった。今後の課題として、大規模計算に耐えうる並列化処理の必要性がある。また、現在使用している Born 近似は散乱角が  $180$  付近の backward 散乱の効果を過小評価してしまうため、衝突断面積モデルのアップデートも必要である。

### 参考文献

- Aschour-Abdalla, and Kennel, Nonconvective and convective electron cyclotron harmonic instabilities, *J. Geophys. Res.*, **83**, 4, 1978.
- Grodent, et al., On the origin of Saturn's outer auroral emission, *J. Geophys. Res.*, **115**, A08219, 2010.
- Morioka et al., Fundamental characteristics of field-aligned auroral acceleration derived from AKR spectra, *J. Geophys. Res.*, **117**, A02213, 2012.
- Newell et al., Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget, *J. Geophys. Res.*, **114**, A09207, 2009.
- Porco et al., Cassini observes the active south pole of Enceladus, *Science*, **311**, doi:10.1126/science.1123013, 2006.
- Pryor et al., The auroral footprint of Enceladus on Saturn, *Nature*, **472**, doi:10.1038/nature09928, 2011.
- Richardson, Thermal plasma and neutral gas in Saturn's magnetosphere, *Rev. Geophys.*, **36**, 501-524,

1998.

Smith et al., Enceladus plume variability and the neutral gas densities in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **115**, A10252, 2010.

Sobrinho et al., Elastic and absorption cross sections for electron-hydroxyl radical collisions, *Phys. Rev. A*, **70**, 032717, 2004.

Villalon and Burke, Pitch angle scattering of diffuse auroral electrons by whistler mode waves, *J. Geophys. Res.*, **100**, A10, 19,361-19,369, 1995.

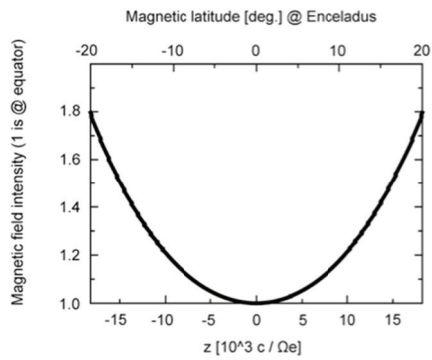


図1、シミュレーション空間内での磁場（ダイポール）。z方向は $c/\Omega e$ で規格化。

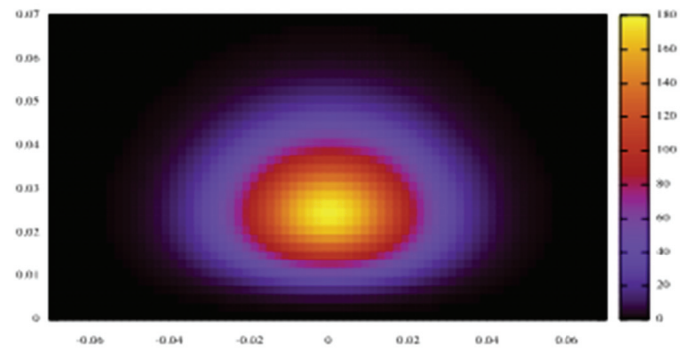


図2、赤道域での初期分布。

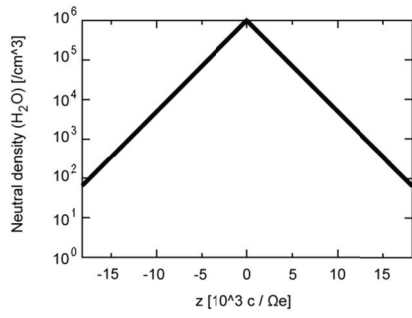


図3、背景 H<sub>2</sub>O 密度

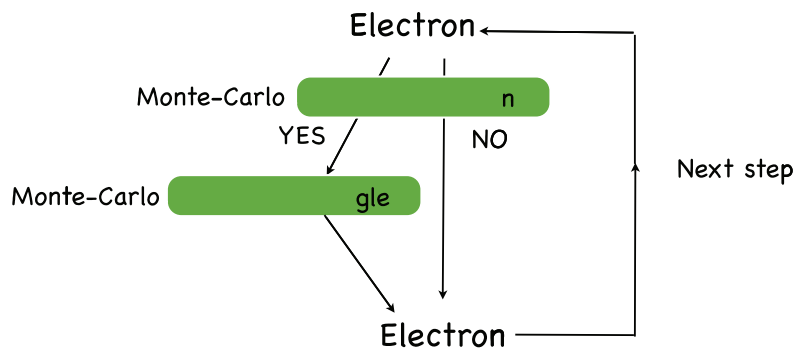


図4、計算フローチャート