

ELFIN 衛星と EISCAT レーダーの観測結果を用いて解き明かす降り込み電子にはたらくミラー力が電子密度の高度分布に与える効果

#田中 友啓¹⁾, 小川 泰信²⁾, 加藤 雄人³⁾, 吹澤 瑞貴²⁾, Artemyev Anton⁴⁾, Angelopoulos Vassilis⁴⁾, Zhang Xiaojia⁵⁾
(¹ 総研大, ² 極地研, ³ 東北大・理・地球物理, ⁴ カリフォルニア大学ロサンゼルス校, ⁵ テキサス大学ダラス校)

Effects of mirror force for precipitating electrons on altitude profiles of electron density with ELFIN and EISCAT observations

#Tomotaka Tanaka¹⁾, Yasunobu Ogawa²⁾, Yuto Katoh³⁾, Mizuki Fukizawa²⁾, Anton Artemyev⁴⁾, Vassilis Angelopoulos⁴⁾, Xiaojia Zhang⁵⁾

(¹The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, ²National Institute of Polar Research, ³Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴University of California, Los Angeles, ⁵University of Texas at Dallas)

Energetic Electron Precipitation (EEP) causes various phenomena, such as aurora emissions and variations in atmospheric compositions via collisions with the atmosphere. To quantitatively study the effects of EEPs on the atmosphere is one of the essential fundamentals for understanding how precipitating electrons with various pitch angle distributions ionize the atmosphere. However, the basic processes involved in the propagation of precipitating electrons and the production of secondary electrons still need to be well understood. Katoh et al. [under review] recently suggested by numerical simulations that the magnetic mirror effect can vary the altitude profile of atmospheric ionization. Therefore, the purpose of this study is to understand observationally the mirror effects on atmospheric ionization so that we would verify the numerical simulation results.

In this study, we used simultaneous observation data of ELFIN satellites and EISCAT radars as well as numerical simulation data for connecting them. The ELFIN satellites consist of two CubeSats flying in formation on nearly identical orbits at an altitude of around 450 km, observing pitch-angle resolved fluxes of electrons in the 50 -7000 keV energy range from September 2018 to September 2022. We used altitude profiles of electron density at altitudes of 60 - 170km observed with the EISCAT Tromso UHF/VHF radars. We found 42 events which are simultaneously observed by EISCAT radar in Tromso [19.2 E, 69.6N] and ELFIN satellite in the region within ± 2 degree latitude and ± 5 degree longitude from Tromso. Among them, 33 events had significant ionization by EEP at altitudes below 100 km. We adopted the numerical simulation used in Katoh et al., which is a particle transport simulation using the Monte Carlo method. This simulation allows us to quantitatively investigate how the mirror force could affect the atmospheric ionization rate and production of secondary electrons, especially backscattering electrons. Specifically, we calculated, with the numerical simulation, the altitude profile of the collision rate of all the precipitating electrons under two conditions, with/without the mirror effect. Inputs of the energy and pitch-angle profiles of electron flux were used for the data observed by ELFIN satellites. We plan to compare and verify the characteristic of the altitude profile of the ionization-rate/electron-density based on that collision rate with that of electron density simultaneously observed by EISCAT radars.

First, we studied how the mirror effect varied the altitude profile of collision rate below 100 km using the 7th January 2021 simultaneous event. We found that the mirror effect made a difference in the collision rate if we considered the energy and pitch-angle profile of precipitating electron flux observed with ELFIN satellites. The collision rate with the mirror effect was about half of that without the mirror effect. As Katoh et al. suggested, electrons out of the loss cone reduce the collision rate at altitudes between 60 and 80km because they are bounced at a mirror point so that the number of electrons penetrating the low-altitude atmosphere decreases.

According to the result of the numerical simulation, it is useful to verify differences between with and without the mirror effect on the atmospheric ionization and the production of secondary electrons if many precipitating electrons have pitch angles near the loss cone angle. We found 4 events, 5th October, 27th November, 16th December in 2021, and 29th March in 2022, have distributions as mentioned.

In this presentation, we will discuss if the mirror effect makes some differences in atmospheric ionization by comparing with altitude profiles of the electron density simultaneously observed by EISCAT radar.

高エネルギー電子降下 (Energetic Electron Precipitation; EEP) は、中性大気との衝突を介して、オーロラ発光や大気成分の変動といったさまざまな現象を引き起こす。様々なピッチ角分布で降下する電子が大気をどのように電離するかを理解することは、EEPによる大気への影響を定量的に把握するうえで欠かせない基礎となる。しかし、降下電子の大気中の伝搬及び2次電子生成に関わる基本的なプロセスは、十分に理解されたとはいえないのが現状である。最近、Katoh et al. [under review]において、そのプロセスの1つである磁気ミラー効果の有無によって大気電離の高度分布が変わりうる事が数値シミュレーションによって示唆された。そこで本研究は、その数値シミュレーション結果の検証を視野に入れて、磁気ミラー力の効果が大気電離に与える影響を観測的に明らかにすることを目的とする。

本研究では、ELFIN 衛星と EISCAT レーダーとの同時観測データ及び、その両者を繋ぐ数値シミュレーションデータ

を使用した。Angelopoulos et al.(2020) より、ELFIN 衛星は高度 450 km 付近をほぼ同一の軌道で編隊飛行する 2 基の CubeSat で構成され、50 -7000 keV のエネルギー帯の電子のピッチ角分解されたフラックスを 2018 年 9 月から 2022 年 9 月まで観測していた。EISCAT レーダーについては、トロムソ UHF/VHF レーダーで観測された電離圏高度 60-170 km の電子密度データを使用した。ELFIN 衛星がトロムソ [19.2 deg E, 69.6 deg N] から緯度± 2 度以内及び、経度± 5 度以内の上空を通過している間に、EISCAT と同時に観測しているイベントは 42 例存在した。その内、EEP による顕著な電離が高度 100km 以下に存在したイベントは 33 例であった。数値シミュレーションには、Katoh et al. で用いられたモンテカルロ法での粒子輸送シミュレーションを用いた。このシミュレーションにより、磁気ミラー効果の有無が、大気電離率や 2 次電子生成（特に後方散乱電子の生成）にどのような影響を与えるかを定量的に調査できる。具体的には、ELFIN 衛星で観測された電子フラックスのエネルギーピッチ角分布と、1 電子当たりの衝突率を計算した数値シミュレーションを基に、大気へ降下する全電子による衝突率をミラー力の有無を区別して導出する。その衝突率に基づく大気電離率/電子密度の高度分布の特徴を、EISCAT レーダーで同時に観測された電子密度分布の特徴と比較・検証する。

まず 2021 年 1 月 7 日の同時観測イベントについて、前述の方法で 100km 以下の低高度における衝突率がミラー効果の有無によってどのように変化するかを検証した。その結果、実際の降下電子フラックスの観測値を基に計算した場合でも、ミラー力の有無により衝突率に違いが出ることが分かった。60-80km の高度においてミラー効果を考慮した場合の衝突率は、考慮しない場合の衝突率に対しておよそ 1/2 であった。Katoh et al. で示唆された通り、ミラー効果を考慮した場合に低高度で衝突率を低下させるのはロスコーン外にある電子であり、ミラー点で反射されることで低高度まで降り込む電子が減少することが理由である。

数値シミュレーションの解析結果から、ロスコーン付近のピッチ角をもつ電子が多く分布するイベントを用いることで、大気電離率や 2 次電子生成においてミラー効果の有無による差を検証しやすいと考えている。そのようなピッチ角分布を持つ降下電子イベントを探した結果、2021 年 10 月 5 日、2021 年 11 月 27 日、2021 年 12 月 16 日、2022 年 3 月 29 日の 4 イベントが該当することが分かった。

本発表では、これらのイベントについて、EISCAT レーダーで同時観測された電子密度の高度分布データも組み合わせ用いることにより、磁気ミラー力の有無による特徴の違いや影響について議論することを予定している。