

オーロラスペクトログラフによる上部電離圏 N₂⁺ の共鳴散乱光観測

遠藤 友 [1]; 坂野井 健 [2]; 小川 泰信 [3]; 鍵谷 将人 [4]

[1] 東北大・理・地物; [2] 東北大・理; [3] 極地研; [4] 東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター

N₂⁺ resonant scattering light observation in the sunlit topside ionosphere with the auroral spectrograph

Yu Endo[1]; Takeshi Sakanoi[2]; Yasunobu Ogawa[3]; Masato Kagitani[4]

[1] Geophysics, Tohoku Univ.; [2] Grad. School of Science, Tohoku Univ.; [3] NIPR; [4] PPARC, Tohoku Univ

We report the ground-based optical remote-sensing of molecular ion upflow by measuring 427.8 nm N₂⁺ resonant scattering in the sunlit topside ionosphere. *Stormer* [1955] has summarized his work on sunlit aurora during the period from 1918 to 1943. He observed the sunlit aurora extending to 700-1100 km altitudes and found the strong emission of N₂⁺. *Bates* [1949] suggested that the N₂⁺ emission at 427.8 nm is resonant scattering in the sunlit region. *Wallace and McElroy* [1966] supposed that N₂⁺ ion is generated in F-region by the charge exchange reaction between O⁺ and N₂. Besides, satellite data showed N₂⁺ emission in the altitude range from 400 to about 1,000 km. The MSX satellite observed first the N₂⁺ emission probably caused by N₂⁺ upflow from the topside ionosphere [*Romick et al.*, 1999]. Ion upflow is essential for the source of ion outflow observed in the magnetosphere. O⁺ ion upflow occurs mainly during geomagnetically disturbed conditions [*Moen et al.*, 2004, *Abe et al.*, 1993]. While, the molecular ions such as N₂⁺ was considered to be difficult to outflow from E-region. However, these molecular ions were also measured at about 10,000 km altitudes [*Yau et al.*, 1993], and the influence of these ions on the magnetic dynamics and the evolution of planetary atmosphere is important.

Thus, we focus on N₂⁺ 427.8 nm emission data taken by Aurora Spectrograph (ASG) at Longyearbyen, Svalbard (geographic latitude : 75.2 deg and geographic longitude : 16.04 deg) for 13 years to investigate N₂⁺ upflow in the topside ionosphere. In addition to ASG, we use ESR data if it is operated.

The ASG consists of a fish-eye lens, slit, grism and a cooled CCD detector which covers the wavelength range of 420-730 nm with a 2.0 nm spectral resolution and field of view of 180 degrees along the magnetic meridian. The ASG have been operating since 2000, but measuring N₂⁺ emission 427.8 nm since 2004. In many cases, the field-of-view of ESR directs toward the geomagnetic field line (elevation angle : 81.6 degrees), and we can get the ion temperature, electron temperature, electron density and ion velocity from 100 to 600 km with spatial and time resolutions of 2.2-4.5 km and 6s.

The preceding study figured out that there is a high probability that the N₂⁺ outflow occurs in geomagnetically disturbed condition (Kp=4) [*Mizuno et al.*, 2005]. Therefore, we selected the data in the period one month before and after the winter solstice during from 2004 to 2016 in which we could get the auroral data even in the noon because of the high-latitude of the site and the Kp indices were greater than 4. As a result, we detected 10 events of the N₂⁺ resonant scattering light. On 22th January, 2012 (15 UT, Kp=4+), although the auroral arc which has N₂⁺ resonant scattering light passed over ESR, no O⁺ ion upflow was measured. Furthermore, on 21th December, 2015 (7UT), the stable single auroral arc stayed in the same region for about one and a half hours. Assuming the peak altitude of auroral 630 nm emission to be 250 km altitude, we estimated the altitude profile of N₂⁺ emission. We found the auroral 630 nm emission at 250 km altitude correlated well with N₂⁺ 427 nm emission at altitude of 300 km and 400 km with correlation coefficients of 0.749, and 0.641, respectively. These suggests that (1) O⁺ ion is generated by low energy electrons in cusp region and N₂⁺ is generated by the charge exchange between O⁺ and N₂ in the lower F-region, and (2) that N₂⁺ ion goes upward from F-region (not from E-region).

イオンアップフロー現象の光学リモートセンシングのために、我々はロンゲイヤービン・スバルバルにおけるオーロラスペクトログラフ (ASG) の 13 年間分のデータ解析から上部電離圏 N₂⁺ 共鳴散乱光を明らかにした成果を報告する。N₂⁺ 共鳴散乱光の報告は、古くは *Stormer* [1955] と *Bates* [1949] による高度 700-1100 km の日照領域における観測にまでさかのぼる。*Wallace and McElroy* [1966] は O⁺ と N₂ 分子の電荷交換反応によって N₂⁺ が電離圏 F 領域で生成されるとしている。さらに、より高高度に存在する N₂⁺ 発光が MSX 衛星 [*Romick et al.*, 1999] や Reimei 衛星によって観測され、電離圏高度からの重イオンアップフロー現象として近年注目されている。電離圏 F 領域主成分である O⁺ などのイオンは地磁気擾乱時に磁気圏に流出していくことがよく知られている [*Moen et al.*, 2004, *Abe et al.*, 1993]。一方 N₂⁺ などの分子イオンは、電離圏 E 領域から上昇して地球重力脱出速度を超えることが困難のため、流出しにくいと考えられてきた。しかしながら、Akebono 衛星等により高度 10,000 km 付近で観測されており [*Yau et al.*, 1993]、その流出メカニズムに加えて磁気圏ダイナミクス機構や長期的な惑星大気進化への影響が注目されている。

そこで本研究では、上部電離圏における分子イオンアップフロー現象の特徴を明らかにするために、ノルウェー・ロンゲイヤービン (地磁気緯度 75.2 度, 経度 16.04 度) におけるオーロラスペクトログラフの 13 年間の観測データを用いて電離圏 N₂⁺ 共鳴散乱光を調べた。さらに、ノルウェー・ロンゲイヤービンにあるスヴァールバルレーダー (ESR) が稼働している場合には、ESR データも合わせ用いた解析を行った。

オーロラスペクトログラフは魚眼レンズ、スリット、グリズム、冷却 CCD カメラから構成される。波長範囲は 420 nm から 730 nm、波長分解能 2.0 nm、視野角 180 度 (磁気南北方向) である。観測は 2000 年から現在 (2017 年) までの冬季に連続的に行われているが、代表的な N₂⁺ の発光波長の一つである 427.8 nm が観測波長範囲に含まれるのは 2004

年以降の観測データである。ESR は磁力線方向 (仰角 81.6 度) の観測でイオン温度、電子温度、電子密度、イオン速度の物理量を得ることができる。

これまでの研究から N_2^+ アウトフローは地磁気擾乱時 ($K_p > 4$) に発生する確率が高いことが知られている [Mizuno et al., 2005]。そこで 2004 年から 2016 年の期間中、地上が日陰時かつ K_p 指数が 4 以上となる冬至前後 1ヶ月の ASG データに着目してデータ解析を実施した。その結果、電離圏 F 層で N_2^+ 共鳴散乱光が有意に起きていたイベントを合計 10 例検出することができた。これらのイベントの中で、ESR が稼働していた 2012 年 1 月 22 日 (15 UT, $K_p=4+$) には、共鳴散乱光を伴うアークが ESR ビーム上を通過したが、その時間帯に ESR では酸素イオン上昇流が観測されなかった。また、2015 年 12 月 21 日 (7 UT, ~10 MLT) の磁気嵐時にはロングイヤープンの南側 (仰角 15 度付近) でオーロラアークが 1 時間半程度同じ位置で発光しており、このイベントを用いて N_2^+ 発光と 630 nm 発光の時間変化が発光高度によってどのような違いをもつのかを調査した。今回は 630 nm 発光のピークを高度 250 km であると仮定し、 N_2^+ 発光の高度プロファイルを見積もっている。高度 300-400 km の 427 nm と 630 nm の発光強度には強い相関 (相関係数 0.749, 0.641) があり、より高い高度では両者の相関が弱くなることがわかった。これらのことから、(1) 昼側カスプ領域付近では低エネルギー降下電子により電離圏 F 領域で O^+ イオンが生成され、その O^+ イオンと N_2 分子との電荷交換により N_2^+ イオンが生成されること、(2) その生成された N_2^+ イオンが (電離圏 E 領域からではなく) F 領域からさらに上昇することを示唆している。