

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04052

研究課題名（和文）降下粒子から探る超高層大気の寒冷化

研究課題名（英文）Upper Atmosphere Cooling Investigated by Precipitating Particles

研究代表者

小川 泰信（Yasunobu, Ogawa）

国立極地研究所・共同研究推進系・教授

研究者番号：00362210

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：極域超高層大気の種類長期変動を定量的に理解するために、（1）地球への電子降下に伴う超高層大気電離の詳細調査及び、（2）欧州非干渉散乱（EISCAT）レーダーデータに基づく極域電離圏イオン温度の長期変動に関する各種調査を実施した。その結果、（1）については、降下電子に働くミラー力の影響の有無により、100 km以下の高度領域での最大衝突率は1桁小さくなること等が、数値シミュレーションより明らかになった。（2）については、43年間のEISCATレーダーデータを用いて、電離圏温度の寒冷化の特徴を、従来より高い精度で推定可能となったことに加え、季節・高度による寒冷化の特徴の違いが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

（1）の研究成果については、波動粒子相互作用によるピッチ角散乱に起因する高エネルギー電子の降下による電離圏応答の精密なモデル化において、ミラーフォースの重要性を示唆するものである。（2）の研究成果については、下層大気から熱圏までを包括する全大気圏における気候変動の理解と将来予測に貢献する内容である。

研究成果の概要（英文）：In order to quantitatively understand various long-term variations in the polar upper atmosphere, we conducted (1) a detailed investigation of upper atmosphere ionization associated with electron precipitation to the earth and (2) investigations of long-term variations in polar ionospheric ion temperature based on European Incoherent Scatter (EISCAT) radar data. Numerical simulation results show that (1) the maximum collision rate in the altitude range lower than 100 km becomes one order of the magnitude smaller depending on the effect of the mirror force on the electron precipitation. As for (2), the characteristics of ionospheric cooling can be estimated with higher accuracy using 43 years of EISCAT radar data, and differences in the characteristics of ionospheric cooling/warming depending on the season and altitude are also clarified.

研究分野：超高層物理学

キーワード：超高層大気 降下粒子 電離圏 寒冷化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に伴う北極域の急激な温度上昇は、観測事実として近年定着している。しかし、その上空の超高層大気の変動については、地表よりも変動幅が大きいにもかかわらず、未解明な点が多い。温室効果ガスの増大により、超高層大気は理論的には寒冷化していることが数十年前から予測されている。しかし、特に 200 km 以下の高度域では、大気質量密度減少の長期トレンドを議論できる観測データが全く無い。高度 200 km 以上においては、極域イオン温度の中・長期変動に関する研究 (e.g., Ogawa et al., 2014) がなされているが、使用可能なデータに限りがあり、季節による長期変動の違いなどの基本的特徴は明らかにされていない。

2. 研究の目的

極域超高層大気の長期変動を理解するために以下の 2 つを目的とする。

- (1) 宇宙空間・磁気圏から地球に降り込む電子の影響を活用した超高層大気の高度 200 km 以下における大気質量密度の新たな計測手法を検討し、その有効性を調査すること。
- (2) 新たに取得した超高層大気の各種データに基づき、超高層大気の寒冷化や沈降などの長期的変化の描像を明らかにすること。

3. 研究の方法

- (1) 磁気圏から地球大気に降り込む電子が引き起こす電子密度増大の高度分布は、背景の大気質量密度分布の変化に大きく影響を受ける。そのことを利用して、降下電子のエネルギーフラックス分布とそれに起因する電子密度増大の高度分布をインプットとして与えたときに、大気質量密度分布を精度よく推定する手法を検討・調査する。そのために必要となる、降下粒子による電離特性を様々なケースについて調査・把握する。
- (2) 1981 年から極域電離圏の測定を実施している欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダー (トロムソ・ノルウェー) の各種観測モードデータから、40 年間に以上に渡る長期変動解析用の統一データベースを作成する。そのデータベースを基に、イオン温度データから太陽活動 (11 ~ 13 年程度の周期的変動) と季節変化 (年変動) に起因する変動成分を取り除くことにより、太陽活動以外の効果で生じるイオン温度の長期変化 (トレンド) を 200 - 500 km の高度において明らかにする。

4. 研究成果

- (1) 降下粒子による電子密度増大の定量化と、大気質量密度分布の推定手法の調査

(1 - 1) 電離層への高エネルギー電子の降下による衝突率に対するミラー力の効果を調査した。その際、個々の降下電子の運動についてミラー力を含めて解き、降下電子と中性ガスとの衝突についてはモンテカルロ法で計算した。その結果、(a) 100 keV 以上の運動エネルギーを持つ電子に対するシミュレーションの結果、ミラーポイント近傍に衝突率の二次ピークが形成されること、(b) 数十 keV 以上の運動エネルギー領域の電子をロスコーンに近いピッチ角で降下させると、100 km 以下の高度領域での最大衝突率は 1 桁小さくなること、(c) 高度 130 km 付近のミラーポイントから跳ね返された電子が上向きに運動することで、衝突率の高度分布が上向きに広がることが明らかになった。これらの研究成果について、学術雑誌に現在投稿中である。

(1 - 2) (1 - 1) の研究結果により、降下粒子のピッチ角の違いによるミラー力の影響を考慮する必要があることが明らかになったため、本研究に当初用いる予定であった DMSP 衛星データ (ピッチ角分布の情報無し) の利用を取りやめ、ELFIN 衛星 (Angelopoulos et al., 2020) によるピッチ角分布の情報を含む高エネルギー電子の実データの利用に切り替えた。EISCAT トロムソ UHF/VHF レーダーが稼働している期間に ELFIN 衛星の同時観測が成立するイベントを約 20 例見出し、個々のイベントに関する詳細比較解析を現在実施している。その比較結果を基に、経験モデルを用いた仮定をしている大気質量密度分布の妥当性を調査し、質量密度分布を新たに推定する手法を開発・検証する予定である。

(1 - 3) 脈動オーロラを発生させる高エネルギー電子降下に対応する電離圏電子密度分布の調査を実施した。様々なタイプ (構造) の脈動オーロラに対して、EISCAT レーダーから得られる電子密度分布を用いることにより、イオン化学モデルを調査・検証した。その結果、パッチ状の脈動オーロラが支配的な領域において、モデルと EISCAT の電子密度がよく一致することが判明した。ただし、降下電子フラックスに関しては、脈動オーロラのタイプの違いにより、両者に

大きな違いが生じることも明らかになった。

(2) EISCAT レーダーによる極域電離圏長期変動の解明

EISCAT トロムソ UHF レーダーの各種モード観測データを基に、1981年から2023年までの約43年間の統一データベースを作成し、高度220~460 kmにおけるイオン温度の長期変動を推定した。その結果、高度300 km付近では 1.7 ± 0.2 [K/year]の割合でイオン温度が低下している描像が明らかになった(図1参照)。過去33年間分のEISCATデータを用いた解析結果(Ogawa et al., 2014)と比べて、今回の43年間分の電離圏長期変動データ解析の方が、すべての高度に渡って推定精度が高い結果が得られている。さらに、季節ごとの長期変化の解析結果から、(a)冬期には220~450 kmの全高度において1~2 [K/year]の寒冷化の特徴が見られること。それに対し、(b)夏期には高度300 km付近では顕著な寒冷化の特徴(1~2 [K/year]の温度低下)が見られるが、400 km以上の高度においてイオン温度の変化が寒冷化から温暖化に切り替わること、が明らかになった。

これらの解析結果から、(i)中性大気の寒冷化に伴い、高度400 km以上ではイオンと電子とのクーロン衝突の重要性が(中性イオン間の衝突と比べて)高くなること。(ii)夏期には太陽UV/EUVによる電子温度上昇が顕著であり、その結果((i)の影響により)400 km以上の高度でクーロン衝突を介してイオン温度が年々上昇することが推察される。これらの解析結果の検証を進め、議論の内容を深めると共に、学術論文として投稿を予定している。

<引用文献>

- Ogawa, Y., T. Motoba, S. C. Buchert, I. Häggström S. Nozawa, Upper atmosphere cooling over the past 33 years, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5629-5635, doi:10.1002/2014GL060591, 2014.
- Angelopoulos, V., Tsai, E., Bingley, L. et al. The ELFEN Mission. *Space Sci Rev* 216, 103, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00721-7>

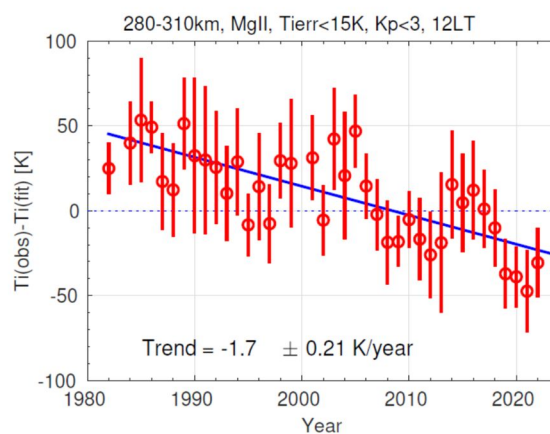


図1: EISCAT トロムソ UHF レーダーの43年間に渡る統一データベースから推定した極域電離圏イオン温度の長期変動。高度280~310 kmのデータを用いている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Stepanov N. A., Sergeev V. A., Shukhtina M. A., Ogawa Y., Chu X., Rogov D. D.	4. 巻 126
2. 論文標題 Ionospheric Electron Density and Conductance Changes in the Auroral Zone During Substorms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Tesfaw Habtamu W., Virtanen Ilkka I., Aikio Anita T., Nel Amore, Kosch Michael, Ogawa Yasunobu	4. 巻 127
2. 論文標題 Precipitating Electron Energy Spectra and Auroral Power Estimation by Incoherent Scatter Radar With High Temporal Resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhang X. J., Demekhov A. G., Katoh Y., Nunn D., Tao X., Mourenas D., Omura Y., Artemyev A. V., Angelopoulos V.	4. 巻 126
2. 論文標題 Fine Structure of Chorus Wave Packets: Comparison Between Observations and Wave Generation Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029330	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Bjoland L. M., Ogawa Y., Lovhaug U. P., Lorentzen D. A., Hatch S. M., Oksavik K.	4. 巻 126
2. 論文標題 Electron Density Depletion Region Observed in the Polar Cap Ionosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2020JA028432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JA028432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

[学会発表] 計7件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Ishizawa, G., Y. Katoh, M. Kitahara
2. 発表標題 Evaluation of nonlinear effects in the pitch angle scattering process of energetic electrons into the loss cone by coherent whistler-mode waves
3. 学会等名 URSI GASS 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤幸碩, 加藤雄人, 北原理弘, 川面洋平, 木村智樹, 熊本篤志
2. 発表標題 磁気赤道周辺での kinetic Alfvén wave による電子加速過程に関するテスト粒子計算
3. 学会等名 第150回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川 泰信, 野澤 悟徳, 田中 良昌, 橋本 大志, 大山 伸一郎, 津田 卓雄, 藤原 均, 西村 耕司, 宮岡 宏, 中村 卓司, 藤井 良一, Ingemar Haggstrom, Craig Heinselman
2. 発表標題 Current EISCAT and next EISCAT_3D database
3. 学会等名 第148回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤雄人, パウル ローゼンダール, 小川泰信
2. 発表標題 Simulation study of the energetic electron precipitation in the polar region considering the magnetic mirror force
3. 学会等名 第148回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤幸碩, 加藤雄人, 熊本篤志, 木村智樹, 川面洋平
2. 発表標題 オーロラ電子加速過程に関わる電磁圏プラズマの沿磁力線分布についての研究
3. 学会等名 第148回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Saito, K., Y. Katoh, A. Kumamoto, T. Kimura, Y. Kawazura
2. 発表標題 Plasma distribution solver for the field-aligned distribution of ionospheric/magnetospheric plasma related to the auroral electron acceleration process
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	加藤 雄人 (Kato Yuto) (60378982)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------