

目次

第 1 章	イントロダクション	3
1.1	オゾンの重要性とオゾン減少	3
1.2	先行研究の結果と課題	3
1.3	本研究の目的と研究手法	8
第 2 章	ミリ波観測法	9
2.1	観測手法	9
2.1.1	観測手法の概観と観測装置	9
2.1.2	電波強度のキャリブレーション	13
2.1.3	光学的厚み	13
2.1.4	周波数スイッチング	17
2.2	観測場所	20
2.2.1	ノルウェー・トロムソでの観測 (69.35°N, 19.14°E)	20
2.2.2	南極・昭和基地での観測 (69.00°S, 39.85°E)	21
第 3 章	ミリ波観測のデータ解析	24
3.1	光学的厚みの測定データを基にしたスクリーニング	25
3.2	NO スペクトルデータのバックグラウンドノイズを基にしたスクリーニング	26
3.3	トロムソにおける光学的厚みの測定データの異常値の検討	27
3.4	NO スペクトルデータのベースラインの補正	29
3.5	NO 柱密度 (Column Density) の導出	34
第 4 章	結果	35
4.1	ノルウェー・トロムソでの解析結果	35
4.2	南極・昭和基地での解析結果	35
第 5 章	考察	37
5.1	SOFIE の観測データから導出された NO 柱密度との比較	37
5.2	高エネルギー電子の降り込みとの比較	39
5.2.1	Dst 指数との比較	39
5.2.2	POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータとの比較	41
5.2.3	OMNI Data Set との比較	44
第 6 章	まとめ	47
付録 A	Dst 指数	53
付録 B	SOFIE	54
付録 C	POES/MetOp	55

付録 D	OMNI Data Set	57
付録 E	発表実績	58

第6章 まとめ

我々のグループでは、両極域での相補的な観測を実現するために、北極域において分光計の新設、南極域において分光計の改良を行っている。そこで、新設・改良されたミリ波分光計のためのデータ解析手法を確立した。さらに、その解析結果から、その時地球に降り込んできた高エネルギー粒子の物理量および磁気圏の物理状態と NO 増加量の関係を明らかにした。

本研究では、ミリ波分光計の仕様が異なる昭和基地とトロムソ両方のスペクトルデータの解析手法を検討した後、トロムソについては 2018 年 12 月 26 日から 2019 年 3 月 10 日までの 75 日間、昭和基地については 2023 年 3 月 22 日から 31 日までの 10 日間にわたる NO の観測データの中から NO の柱密度の導出を行って、その変動について考察した。

トロムソの分光計では積分時間は 24 時間であったが、NO の 6 本の超微細構造線から導出される柱密度を平均することで、昭和基地における積分時間は 12 時間と短くした。昭和基地での柱密度の誤差の平均はトロムソでの観測と比べて 20% 小さくなり、時間分解能を小さくしながら柱密度の誤差を小さくすることができた。

トロムソで観測されたミリ波分光による NO の柱密度について、SOFIE による衛星観測での NO の高度プロファイルデータから導出した柱密度と比較を行った結果、NO の柱密度の時間変動について傾向が一致していることが分かった。しかし、SOFIE から導出した NO の柱密度は、ミリ波分光計から導出した NO の柱密度と比べておよそ 1.65 倍されたものとなっていた。これの原因の一部として、NO の柱密度を導出する際に仮定した大気温度の値が妥当でない可能性があった。ミリ波分光計を用いた NO の柱密度の導出において仮定する大気温度の再検討をしたが、これだけで、SOFIE から導出した NO の柱密度との値の差を説明することはできなかった。NO の柱密度を導出する際には、大気温度を高度ごとに設定することも考慮に入れる必要がある。

解析期間に地磁気擾乱があったかどうかを調べるため、ミリ波分光による NO の柱密度の時間変動を Dst 指数の時間変動と比較した。その結果、トロムソにおける NO の柱密度の急激な増加がみられた 2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日の期間、昭和基地における NO の柱密度の急激な増加がみられた 2023 年 3 月 23 日～2023 年 3 月 24 日の期間に対応して Dst 指数の変化がみられ、NO の増加が磁場の擾乱により加速された電子の影響と考えた。

実際に電子の降り込みがあったか確認するために、POES による衛星観測での電子フラックスデータの中でも、トロムソ・昭和基地付近に降り込むと考えられるデータを用いて、ミリ波分光による NO の柱密度の時間変動と比較を行った。その結果、トロムソ・昭和基地におけるすべての NO の柱密度の増加に共通して、比較的能量の大きい > 287 keV における電子の増加が確認できた。比較的能量の小さい > 40 keV や > 130 keV の電子フラックスの増加があった期間では、顕著な NO の増加がみられなかった。

降り込む粒子の物理量および磁気圏の物理状態と NO 増加量の関係を明らかにするため、磁気圏

と電離層の様子を調べることができる OMNI Data Set を用いた比較を行った。トロムソ・昭和基地で NO の柱密度の増加を 4 回確認することができたが、その内の 2 回において、磁気嵐の主相である時期、1 回は磁気嵐の回復相かつ高速太陽風の到達した時期であることが分かった。トロムソにおいては、NO の柱密度の増加が確認された 2 つの時期どちらにおいても、地球磁場の南北成分のゆらぎがあり、サブストームが活発で高速太陽風が吹いていることが確認できた。トロムソにおいては、2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日における柱密度の増加について、磁気嵐の主相にあたる時期であることが分かった。昭和基地においては、磁気嵐の発生と対応して NO の柱密度が増加した 2023 年 3 月 23 日～2023 年 3 月 24 日において地球磁場が南方向を向いており、プロトンの密度も上昇していることが確認できたが、高速太陽風は確認できなかった。もう 1 つ柱密度の増加が確認できた 2023 年 3 月 25 日においては、SYM/H（もしくは Dst 指数）の値をみると磁気嵐は回復相にあたるが、高速太陽風があることが確認できた。これより、磁気圏から回復する期間であっても高速太陽風が到達していると電子の降り込みがあり、NO の増加に影響を与えられらる。磁気嵐の回復相で、磁場の南北成分の振動の中心が南向きのときに高速太陽風が到達する際に、電子の降り込みがあることは先行研究 [18] でも確認されている。

参考文献

- [1] E Rozanov, M Calisto, T Egorova, T Peter, and W Schmutz. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surveys in geophysics*, Vol. 33, pp. 483–501, 2012.
- [2] A Seppälä, CE Randall, Mark A Clilverd, E Rozanov, and CJ Rodger. Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 114, No. A10, 2009.
- [3] M López-Puertas, B Funke, S Gil-López, T Von Clarmann, GP Stiller, M Höpfner, S Kellmann, H Fischer, and CH Jackman. Observation of NO_x enhancement and ozone depletion in the northern and southern hemispheres after the october–november 2003 solar proton events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, No. A9, 2005.
- [4] Y Isono, A Mizuno, T Nagahama, Y Miyoshi, T Nakamura, R Kataoka, M Tsutsumi, MK Ejiri, H Fujiwara, H Maezawa, et al. Ground-based observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over antarctica in 2012–2013. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 119, No. 9, pp. 7745–7761, 2014.
- [5] A Mizuno, T Nagahama, A Morihira, H Ogawa, N Mizuno, Y Yonekura, H Yamamoto, H Nakane, and Y Fukui. Millimeter-wave radiometer for the measurement of stratospheric ClO using a superconductive (SIS) receiver installed in the southern hemisphere. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 23, No. 7, pp. 981–995, 2002.
- [6] 伊藤弘樹. ノルウェー・トロムソに向けたミリ波分光観測装置の開発～NO 分子両極域同時観測を目指して～. 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文, 2017.
- [7] 上村美久. 地上ミリ波観測装置による極域中間圏一酸化窒素の時間変動. 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文, 2014.
- [8] 中井 直正, 坪井 昌人, 福井 康雄 (編). 宇宙の観測 II 電波天文学, シリーズ現代の天文学, 第 16 巻, 5.3.2 節, p. 203. 日本評論社, 第 1 版, 2009.8.
- [9] B Ulich, J Davis, P Rhodes, and J Hollis. Absolute brightness temperature measurements at 3.5-mm wavelength. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 28, No. 3, pp. 367–377, 1980.
- [10] Y Isono, A Mizuno, T Nagahama, Y Miyoshi, T Nakamura, R Kataoka, M Tsutsumi, MK Ejiri, H Fujiwara, and H Maezawa. Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over antarctica associated with a magnetic storm in april 2012. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 7, pp. 2568–2574, 2014.
- [11] 岩田裕之. 南極昭和基地における中層大気多分子同時観測のためのミリ波分光観測装置フロントエンドの開発. 名古屋大学大学院 工学研究科 修士論文, 2019.
- [12] 小瀬垣貴彦. 南極昭和基地における中層大気多分子同時観測のためのミリ波分光観測装置フ

- ロントエンドの開発. 名古屋大学大学院 工学研究科 修士論文, 2020.
- [13] T Nakajima, K Haratani, A Mizuno, K Suzuki, T Kojima, Y Uzawa, S Asayama, and I Watanabe. Waveguide-type multiplexer for multiline observation of atmospheric molecules using millimeter-wave spectroradiometer. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 41, pp. 1530–1555, 2020.
 - [14] K Sakuma, S Rachi, G Mizoguchi, T Nakajima, A Mizuno, and N Sekiya. A superconducting dual-band bandpass filter for if signals of multi-frequency millimeter-wave atmospheric spectrometer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 33, No. 5, pp. 1–4, 2023.
 - [15] 後藤宏文. トロムソにおける一酸化窒素 (NO) スペクトルデータのスクリーニングとキャリブレーションに関する考察. 名古屋大学 工学部 卒業論文, 2021.
 - [16] Kyoto World Data Center for Geomagnetism. Mid-latitude geomagnetic indices "ASY" and "SYM" for 2009 (provisional). <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>, 2010.
 - [17] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, T Kamei, M Sugiura, and T Araki. Auroral electrojet (AE) indices for January - December 1992 (provisional). <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/onAEindex.html>, 1992.
 - [18] Y Miyoshi, R Kataoka, Y Kasahara, A Kumamoto, T Nagai, and MF Thomsen. High-speed solar wind with southward interplanetary magnetic field causes relativistic electron flux enhancement of the outer radiation belt via enhanced condition of whistler waves. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, No. 17, pp. 4520–4525, 2013.
 - [19] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, M Nose, T Iyemori, M Sugiura, and T Kamei. Geomagnetic Dst index. doi:10.17593/14515-74000, 2015.
 - [20] M Sugiura and T Kamei. Equatorial Dst index 1957-1986. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>, 1986.
 - [21] Kyoto World Data Center for Geomagnetism. Version definitions of AE and Dst geomagnetic indices. https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/pdf/AEDst_version_def_v2.pdf, 2022.
 - [22] JM Russell III, SM Bailey, LL Gordley, DW Rusch, M Horányi, ME Hervig, GE Thomas, CE Randall, DE Siskind, MH Stevens, et al. The aeronomy of ice in the mesosphere (AIM) mission: Overview and early science results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71, No. 3-4, pp. 289–299, 2009.
 - [23] Utah State University Space Dynamics Laboratory. Aeronomy of ice in the mesosphere (AIM) solar occultation for ice experiment (SOFIE) instrument user guide. https://sofie.gats-inc.com/documents/docs_software/SOFIE_Users_Guide_sdl06-303.pdf, 2006.
 - [24] J Green. External users manual POES/MetOp SEM-2 processing. https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/External_Users_Manual_POES_MetOp_SEM-2_processing_V1.pdf, 2013.
 - [25] J Green. MEPED telescope data processing theoretical basis document version 1.0. [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/MEPED%20telescope%](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/MEPED%20telescope%20)

- 20processing%20ATBD_V1.pdf, 2013.
- [26] JH King and NE Papitashvili. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly wind and ACE plasma and magnetic field data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, No. A2, 2005.
 - [27] J King, N Papitashvili, GSFC/SPDF, and ADNET Systems, Inc. One min and 5-min solar wind data sets at the Earth's bow shock nose. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/HR0docum.html>, 2023.
 - [28] CT Russell. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic electrodynamics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184–196, 1971.