

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 データによって導出された 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	41
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

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] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, M. Nose, T. Iyemori, M. Sugiura, and T. Kamei. Geomagnetic Dst index. doi:10.17593/14515-74000, 2015.
 - [19] M Sugiura and T Kamei. Equatorial Dst index 1957-1986. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>, 1986.
 - [20] 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.
 - [21] 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.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] J Green. MEPED telescope data processing theoretical basis document version 1.0. https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/MEPED%20telescope%20processing%20ATBD_V1.pdf, 2013.
 - [25] 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.

- [26] 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.
- [27] CT Russell. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic electrodynamics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184–196, 1971.

付録 A Dst 指数

Dst 指数のデータは地磁気世界資料センター京都 (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto) より調べた [18]。Dst 指数とは、地磁気擾乱の大きさを表す指数であり、地磁気擾乱が起きる際に発生する、地球を取り巻く環状の電流 (Ring Current) がどの程度地球磁場をどのくらい打ち消すかを表したものである。Dst 指数は、4 か所 (Hermanus, Kakioka, Honolulu, San Juan) で観測された地磁気の南北成分をもとに 1 時間値で導出される [19]。実際に地磁気擾乱が発生した場合は、値が急激に減少し、大きな負の値を取る。また、トロムソの解析結果との比較に用いた Dst 指数は暫定値 (Provisional value) であり、昭和基地の解析結果との比較に用いた Dst 指数は速報値 (Real-time value) である。暫定値はノイズなどを人目で取り除いたデータから算出されているが、速報値はノイズ除去などの操作を行う前の生データから算出されているため正確ではない値を含んでいることに注意する必要がある [20]。本研究では、地磁気擾乱が起きたかの判断をするための目安として用いた。

付録 B SOFIE

SOFIE (Solar Occultation for Ice Experiment) は 2007 年 3 月から 2023 年 3 月まで、NASA の AIM (Aeronomy of Ice in the Mesosphere) 衛星に搭載されて運用された [21, 22]。AIM 衛星は、極中間圏雲 (PMC: Polar Mesospheric Cloud) の研究のために打ち上げられ、太陽同期軌道で周回する。SOFIE では、とくに PMC が形成される領域の大気における分子や温度、微粒子を観測するために設計され、5 種類の分子 (H_2O ・ CO_2 ・ O_3 ・ CH_4 ・ NO) と PMC の消失を 11 の波長で観測し、流星により発生した粒子について 3 つの波長で観測している。これらの観測からそれぞれの高度プロファイルデータが取得され、高度分解能はおよそ 2 km である。SOFIE は太陽掩蔽法を用いて、主に極域において観測が行われており、SOFIE に対して太陽が日の出や日の入りをする際に、地球大気の縁をかすめるように通過した太陽光について赤外分光観測を行う。本研究においては、Version 1.3 Data を用いており、<http://sofie.gats-inc.com/swdocs> より取得した。トロムソのミリ波分子計による NO の柱密度の導出を行った期間においては、トロムソ付近の緯度（およそ 65 - 80°N の範囲）で日の入りの観測を行っていたため、この観測データを用い、NO の高度プロファイルデータを比較対象として用いた。

付録 C POES/MetOp

POES/MetOp (Polar Orbiting Environmental Satellites/Meteorological Operational Satellites、以下 POES 衛星) は NOAA (アメリカ海洋大気庁: National Oceanic and Atmospheric Administration) Space Weather Prediction Center によって開発・運用されており、太陽同期軌道で周回する衛星である [23]。POES 衛星には SEM-2 (Space Environment Monitor-2) という観測装置が搭載されており、TED (Total Energy Detector) と MEPED (Medium Energy Proton and Electron Detector) で構成される。MEPED は、高エネルギーイオンと高エネルギー電子のフラックスを測定しており、in situ 観測で行われる。

高エネルギー電子の観測においては、4つのエネルギーバンドをもち (> 40 keV, > 130 keV, > 287 keV, > 612 keV)、2つの角度 (0° , 90°) のフラックスを測定する。 0° では天頂方向を向いて観測を行っており、 90° では、 0° に対して垂直であり、衛星の速度方向とは逆向きに設置されている [24]。

POES 衛星は複数の衛星で構成されており、運用されている衛星は時期によって異なる。トロムソの NO の柱密度の比較においては 6 基の衛星 (METOP-01, METOP-02, METOP-03, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19) を用い、昭和基地の NO の柱密度の比較においては 5 基の衛星 (METOP-01, METOP-03, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19) を用いた。POES 衛星の観測データについては、<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/dataaccess.html> より取得した。

電子フラックスデータの選定においては、観測場所 (トロムソ・昭和基地) 付近に降り込めると予想されるものであるかどうかを観点において、以下の条件で行った。

1. 0° の電子フラックスデータ
2. L 値

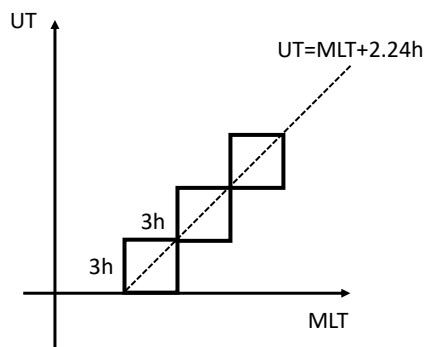
L 値 (L-shell または L-value) とは、磁力線が磁気赤道を横切る際に、地球の中心からどの程度離れているかを地球の半径の何倍かで表したものである。本研究では、L 値が 5.5 – 7.5 の範囲である電子フラックスデータを用いた

3. MLT (Magnetic Local Time) と UT (Universal Time)

MLT とは、一般に用いられる自転軸から定義される LT (Local Time) とは異なり、地磁気極から定義されるものである。トロムソにおいては MLT が UT に対して 2.24 時間進んでいて、昭和基地においては UT と等しいと仮定した。これを踏まえて、条件にあう UT と MLT で観測された電子フラックスデータを用いた (図 C.1)。図中の破線は MLT の UT に対する差の仮定に基づいて、MLT – UT 軸のグラフに表したものである。この破線に沿って MLT $3h \times$ UT $3h$ の Box を考える。この Box 内に含まれる電子フラックスデータを用いる。

以上の条件を満たした電子フラックスデータについて、図 C.1 で示した Box ごとに平均値を計

(a)



(b)

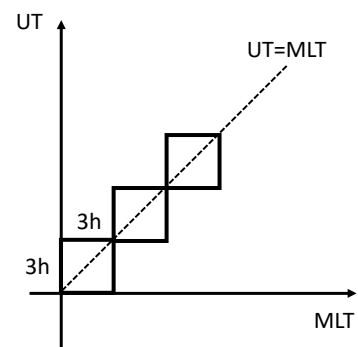


図 C.1: 電子フラックスデータの3時間平均の値の計算に用いる Box (a) トロムソの場合 (b) 昭和基地の場合

算し3時間平均値としてプロットを行った。

付録 D OMNI Data Set

OMNI Data Set は NASA から提供されており、主に磁気圏と電離層における太陽風の影響の調査をサポートすることを目的としたものである [25, 26]。本研究では、OMNI Data Set の中でも High Resolution OMNI data set (HRO) を用いた。HRO は 1 分と 5 分の時間分解能のデータにより構成されており、はじめは 3 つの衛星 (ACE・Wind・IMP 8) のデータによって構成され (2005 – 2006 年)、後の 2007 年に Geotail、2009 年に GOES のプロトンのフラックスデータが追加された。

OMNI Data Set の中でも本研究で用いたデータは以下の 5 つである。

1. 地球磁場の南北 z 成分 B_z (GSM) [nT]

地球磁場の南北成分を表す。GSM (Geocentric Solar Magnetospheric system) とは、座標系の一つである [27]。地球から太陽までを x 軸とし、 y 軸は地球の磁気双極子に対して垂直であり、 z 軸は $y - z$ 平面が双極子軸を含むように定義される。なお、 z 軸は北極の磁極の方向を正とする。

2. 太陽風の速さ [m/s]

3. プロトン密度 [n/cc]

4. AE 指数 [nT]

AE 指数はサブストームに伴う電流の大きさを表すものであり、高緯度オーロラ帯の 12 か所磁場変動の最大値と最小値の差をとったものである。AE 指数においてはトロムソの NO の柱密度の比較においてのみ用いている。昭和基地の解析した期間については AE 指数は 2024 年 1 月 26 日時点で公開されていないため、昭和基地における柱密度との比較では AE 指数は用いていない。

5. SYM/H [nT]

SYM/H は Dst 指数の 1 分値に相当するものである [16]。

付録 E 発表実績

- H Goto, A Mizuno, T Nagahama, T Nakajima, S Nozawa, Y Kojima, T Kawabata, R Fujimori, K Suzuki and Y Ogawa. Research on the Analysis of Nitric Oxide Molecular Spectral Data with Millimeter-Wave Spectroscopic Observations in Tromsø, Norway. JpGU(Japan Geoscience Union Meeting), Online, Jun. 2021.
- H Goto, T Nakajima, T Nagahama, S Nozawa, Y Kojima, T Kawabata, R Fujimori, K Suzuki, Y Ogawa, A Mizuno. A study on the relationship between NO column density and high-energy electrons based on the mm-wave observation at Tromsø. SGEPPS(Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences), Online, Nov. 2021.
- H Goto, A Mizuno, T Nakajima, T Nagahama. A study on the relationship between NO column density and high-energy electrons based on the mm-wave observation at Syowa station. SGEPPS(Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences), 東北大学青葉山北キャンパス, Sep. 2023.