

# 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5章 考察

5章ではミリ波分光計を用いて得られた4章での結果と、ミリ波分光計以外の外部からのデータの比較とを行う。5.1節では、ノルウェー・トロムソにおける解析結果(4.1節)に対し、SOFIE (Solar Occultation for Ice Experiment。詳細は付録B)によって観測されたNO密度の高度プロファイルデータを用いて比較を行う。5.2節では、観測されたNO柱密度の変動に対するEPPの影響を調べるため、高エネルギー電子の降り込み(EEP: Energetic Electron Precipitation)との比較を行う。

### 5.1 SOFIEの観測データから導出されたNO柱密度との比較

まずは、ミリ波分光計を用いたNOの観測データの妥当性を検証するため、SOFIEによって観測されたNOの高度プロファイルデータと比較する。SOFIEのデータは、トロムソでNO柱密度を導出した期間と同じ期間にトロムソ付近の緯度(およそ $65-80^{\circ}\text{N}$ の範囲)で観測された高度ごとのNO密度のデータを用いた。なお、昭和基地においては、ミリ波分光計のデータ解析を行った期間のSOFIE観測データが2024年2月28日時点で公開されていないため、比較を行っていない。

図5.1に、ミリ波分光計によって得られたNO柱密度の時間変化と、SOFIEによって得られたNO柱密度の時間変化と、SOFIEによって得られたNO柱密度の高度プロファイルの時間変化を示す。ミリ波分光計によって柱密度の増加が確認された2つの期間(2019年1月23日~2019年1月27日と2019年2月1日~2019年2月4日)では、SOFIEの高度プロファイルデータでも高度100 km付近においてNOの密度の増加が確認できた(図5.1(a))。

また、ミリ波分光計を用いて導出した柱密度と直接比較を行うため、SOFIEのNO密度の高度プロファイルデータを高度方向に足し合わせて、柱密度を導出した(図5.1(b)のグレーの丸形プロット)。これをさらに1日平均した値をが図5.1(b)の赤い四角プロットである。これらと比較した結果、ミリ波分光計による柱密度の時間変動の傾向が、SOFIEから導出した柱密度とよく一致していることが分かった。しかし、全体的にSOFIEから導出した柱密度の方が、ミリ波分光計による柱密度と比べて全体的に値が大きいことが分かった。

柱密度を導出する際に用いた式(3.5節の式(3.1))を見ると、第1項Aと第2項 $T_{\text{atm}}$ は観測条件によらない定数であり、第3項 $\int T_{\text{NO}} dv$ のみが変数となるため、SOFIEから導出した柱密度とミリ波分光計による柱密度には定常倍のオフセットがあると仮定して二値の比較を行った。ミリ波分光計から求めた柱密度とSOFIEデータから求めた柱密度の1日平均値について散布図を作成した結果を図5.2に示す。ただし、スクリーニングされた期間(2019年2月5日~2019年2月16日)と、検知限界( $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ )を下回るデータは含めていない。また、近似直線は切片を0に固定している(図5.2の黒線。近似直線の式は図の右下に示す)。この結果より、SOFIEによるNO柱

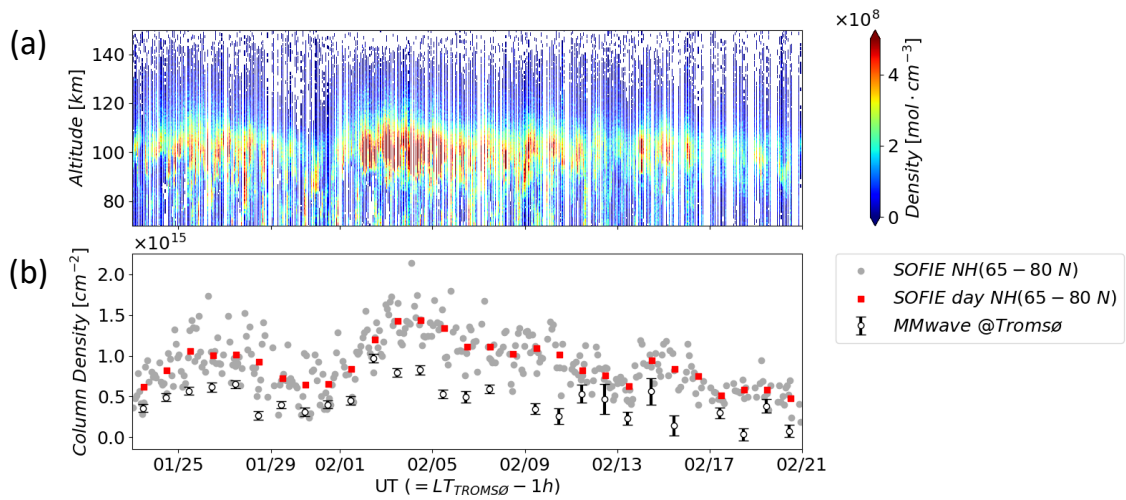


図 5.1: (a)SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータおよび (b) ミリ波分光計を用いて導出した Tromsø の柱密度と SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータから導出した柱密度の比較 (エラーバー付きのプロットがミリ波データから導出した柱密度、グレーの丸形プロットが SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータから導出した柱密度、赤色の四角プロットが 1 日平均した SOFIE の柱密度)

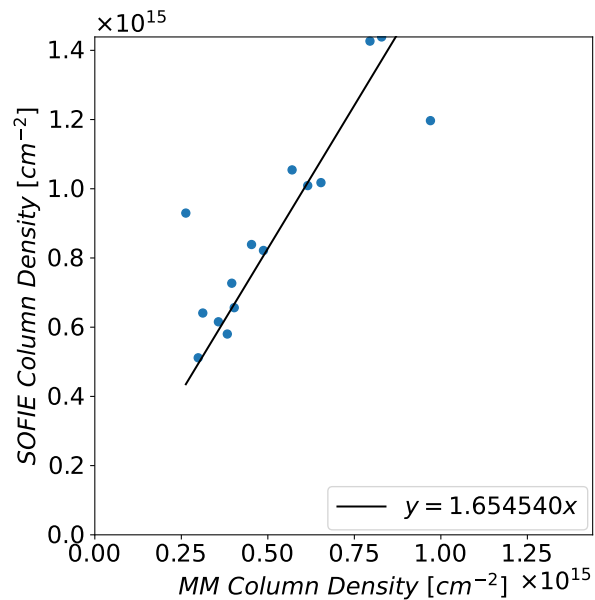


図 5.2: ミリ波分光計から求めた柱密度 (横軸) と SOFIE データから求めた柱密度の 1 日平均値 (縦軸) との散布図 (青色のプロット。黒線は一次近似による直線を示し、右下はその式を表している)

密度はミリ波分光計による柱密度のおよそ 1.65 倍の大きさであることが分かった。この原因のひとつとして、ミリ波分光計で柱密度を導出する際に仮定した大気温度（3.5 節の式 (3.1) の第 2 項  $T_{\text{atm}}$ ）の値が妥当ではない可能性が考えられる。

そこで、NRLMSIS 2.0<sup>1)</sup>を用いて、大気温度の妥当な値を調べた。これを用いて、2019 年 1 月 25 日と 2 月 2 日（ミリ波分光計を用いて導出した NO の柱密度の時間変動のピーク）における高度 100 km 付近（SOFIE の NO の密度の高度プロファイルデータにおける、ピークがある高度）の大気温度を調べたところ、およそ 180 – 250 K の範囲であった。仮に大気温度を 250 K に仮定し直すと、ミリ波分光計を用いて導出した NO の柱密度は 1.25 倍されるが、これだけでは SOFIE で導出した NO の柱密度との値の差を説明することはできない。また、大気温度を高度に依存せず一様と仮定していることも原因として考えられるため、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。繰り返しになるが、解析期間内において北半球の高緯度領域（およそ 65 – 80°N の範囲）を全体的に観測を行う SOFIE と、トロムソで一定点観測を行うミリ波分光計では、観測の対象領域に違いがある。これに関しては、モデル計算の結果とミリ波分光計による観測結果と比較することで解決できる可能性が考えられる。

## 5.2 高エネルギー電子の降り込みとの比較

次に、ミリ波分光計の観測から見出された NO 柱密度変動に対する EPP の影響を調べるため、高エネルギー電子の降り込みとの比較を行った。比較対象として以下の 3 種類のデータを用い、各節に分けて比較結果を述べる。

- Dst 指数（5.2.1 節）
- POES/MetOp 衛星で観測された電子フラックスデータ（5.2.2 節）
- NASA が提供している OMNI Data Set（5.2.3 節）

Dst 指数、POES/MetOp、OMNI Data Set の詳細はそれぞれ付録 A、付録 C、付録 D にて紹介している。

### 5.2.1 Dst 指数との比較

まずは、Dst 指数との比較を行った。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打ち消すかを表したものである（詳細は付録 A）。Dst 指数のデータは、地磁気世界資料センター京都（WDC for Geomagnetism, Kyoto）<sup>2)</sup>より調べた。

トロムソにおける柱密度との比較結果を図 5.3、昭和基地における柱密度との比較結果を図 5.4 に示す。NO の柱密度の増加が確認できた期間に対応して、Dst 指数の急激な減少がみられた。とくに、トロムソにおいては急激な NO の柱密度の増加があった 2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日、

1) <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/NRLMSIS-00/>

2) <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>

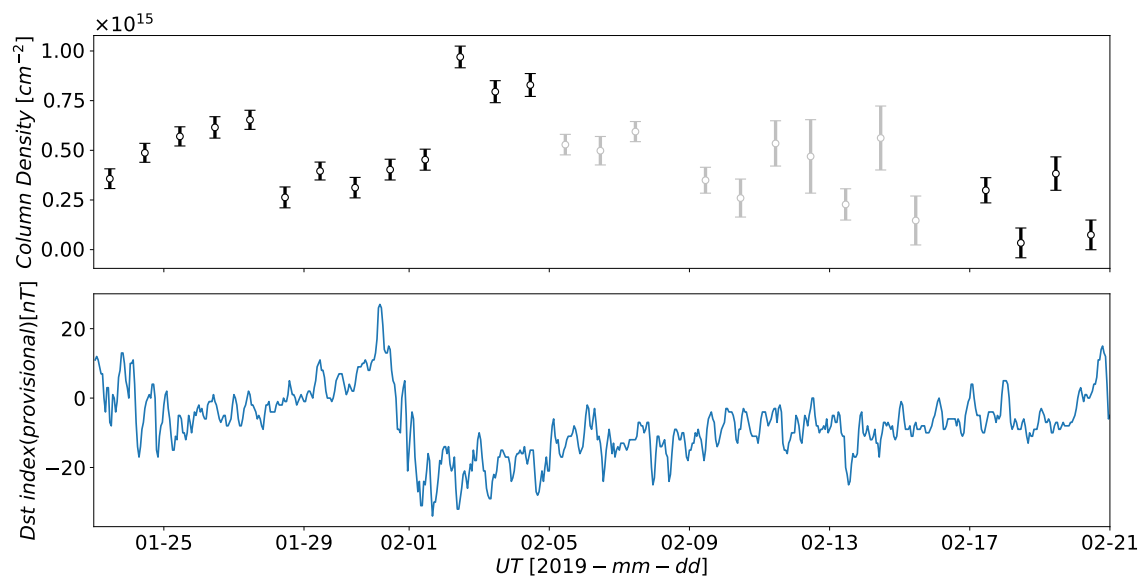


図 5.3: トロムソにおける柱密度（１段目。図 4.2 と同様）と Dst 指数 暫定値（２段目）との比較

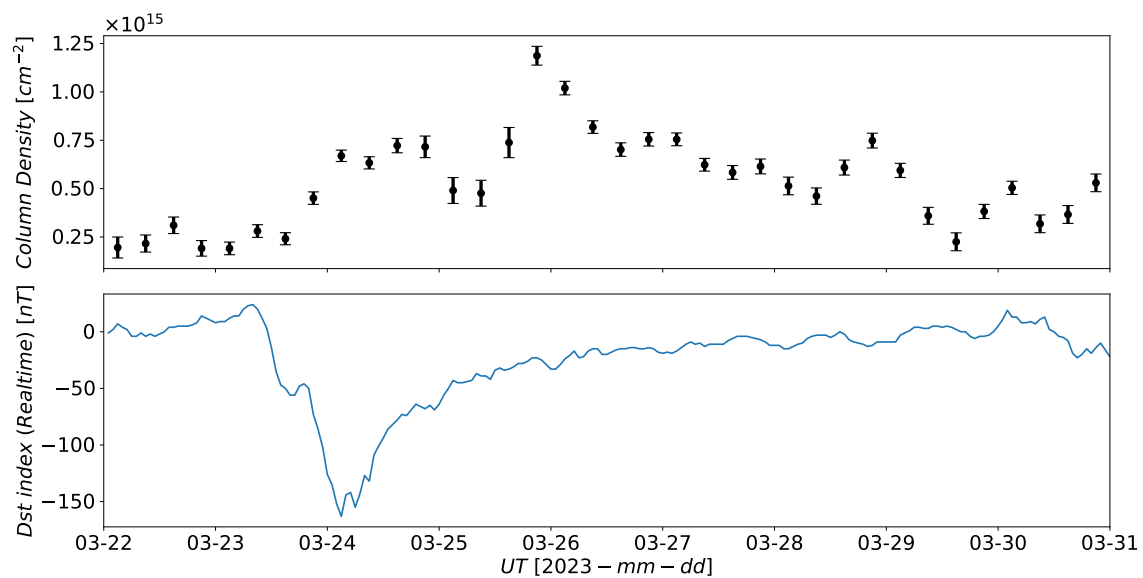


図 5.4: 昭和基地における柱密度（１段目。図 4.2 と同様）と Dst 指数 速報値（２段目）との比較

昭和基地においては 2023 年 3 月 24 日の未明前後における NO の柱密度の増加によく対応している。また、比較的小規模ではあるが、トロムソにおいては 2019 年 1 月 23 日～2019 年 1 月 27 日においても、Dst 指数の減少が確認された。この結果より地磁気擾乱によって加速されて極域に降り込んだ電子により、NO が増加した可能性が考えられる。しかし、それ以外で NO の柱密度の増加が確認できた期間については、Dst 指数の減少は確認できなかった。

## 5.2.2 POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータとの比較

次に、どのようなエネルギーレンジの電子の降り込みが影響しているかを調べるため、POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータを用いた比較を行った。ミリ波分光計の観測場所周辺に降り込む電子のフラックスのみを調べるため、用いるデータについては事前に絞り込みを行った（詳細は付録 C）。この比較結果を見ると、トロムソと昭和基地における比較結果をそれぞれ図 5.5、図 5.6 に示す。電子フラックスデータは電子がもつエネルギーについて、4 つの範囲（ $> 40$  keV,  $> 130$  keV,  $> 287$  keV,  $> 612$  keV）に分けて表してある。

トロムソと昭和基地どちらにおいても、すべての柱密度の増加に対応して電子フラックスの増加がみられた。ただし、おおまかな対応関係があることは確認できたが、電子フラックスの変動のタイムスケールと NO の柱密度の変動のタイムスケールが一致しないため、相関はよくなかった。

トロムソにおいては、Dst 指数の急激な減少が確認でき、急激な NO の柱密度の増加があった期間（2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日）はすべてのエネルギーレンジで電子フラックスの値が大きくなっており、とくに  $> 287$  keV や  $> 612$  keV などのエネルギーが大きい電子フラックスの値が上昇していることが確認できた。また、Dst 指数の減少が比較的小さく、NO の柱密度の緩やかな増加があった期間（2019 年 1 月 23 日～2019 年 1 月 27 日）については、どのエネルギーの範囲の電子フラックスの値も前者の現象と比べると小さいことが分かった。このことより、5.2.1 節で予想したように、EEP の影響とみられる NO の増加が確認できた。

昭和基地においても、Dst 指数の急激な減少が確認でき、NO の柱密度の増加があった期間（2023 年 3 月 23 日 21 時～2023 年 3 月 24 日 3 時）は、ほぼすべてのエネルギーレンジで電子フラックスの増加が確認された。Dst 指数の急激な減少が確認できなかったものの、NO の柱密度の増加があった期間（2023 年 3 月 25 日 9 時～2023 年 3 月 25 日 21 時）においても電子フラックスの増加が確認された。さらに、柱密度の増加が確認できなかった期間（2023 年 3 月 22 日）においても、比較的小さいエネルギーレンジ（ $> 40$  keV,  $> 130$  keV）において電子フラックスの増加がみられた。このことより、比較的大きなエネルギーを持った電子が低い高度まで降り込むことで NO の生成効率を上げていると考えられる。

さらに、NO の増加に影響を与える EPP と磁気圏での物理状態の関係を明らかにする必要があると考えた。そのため、最後に OMNI Data Set を用いた比較を行った。

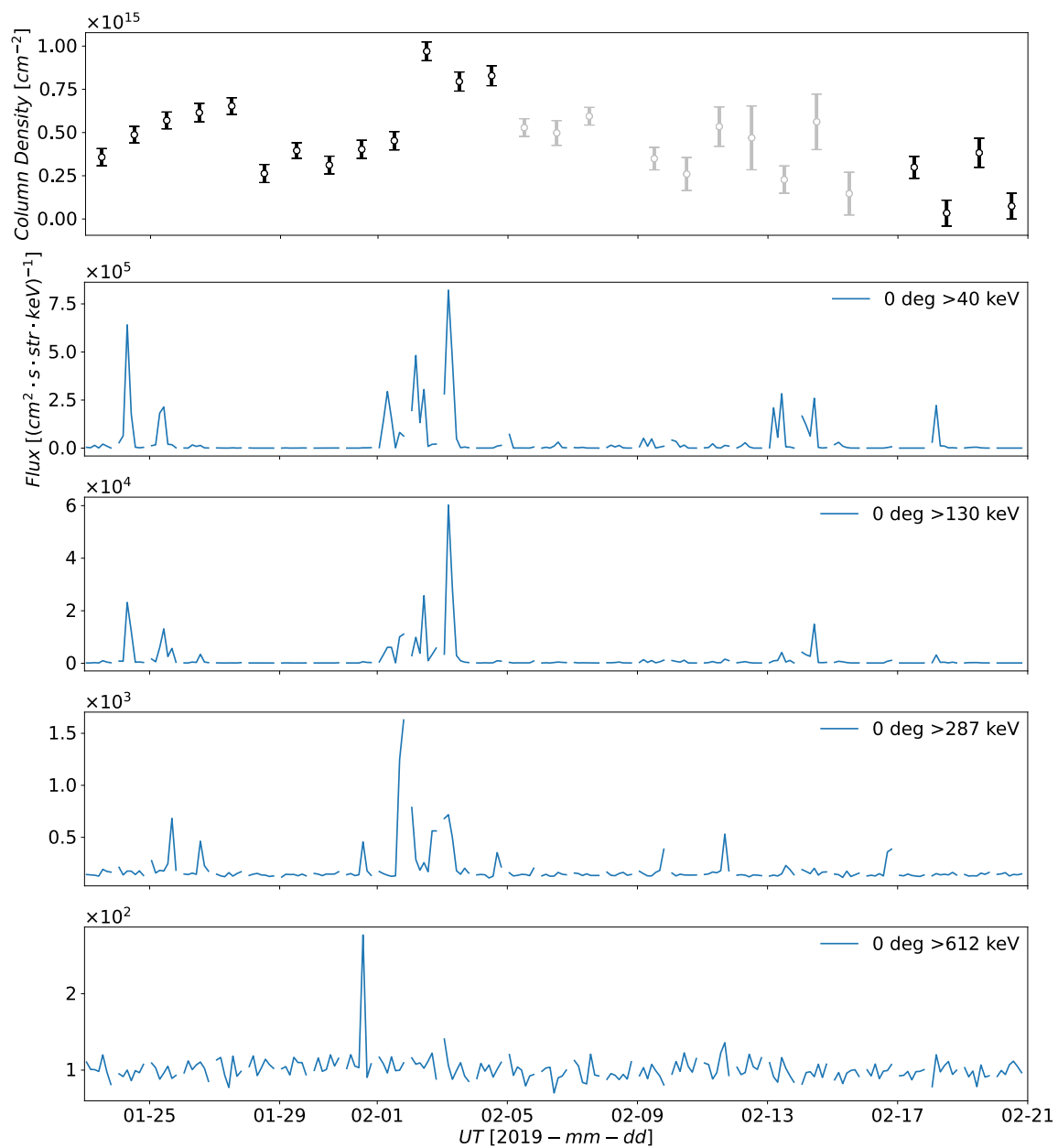


図 5.5: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と電子フラックスデータ（2-5 段目）との比較



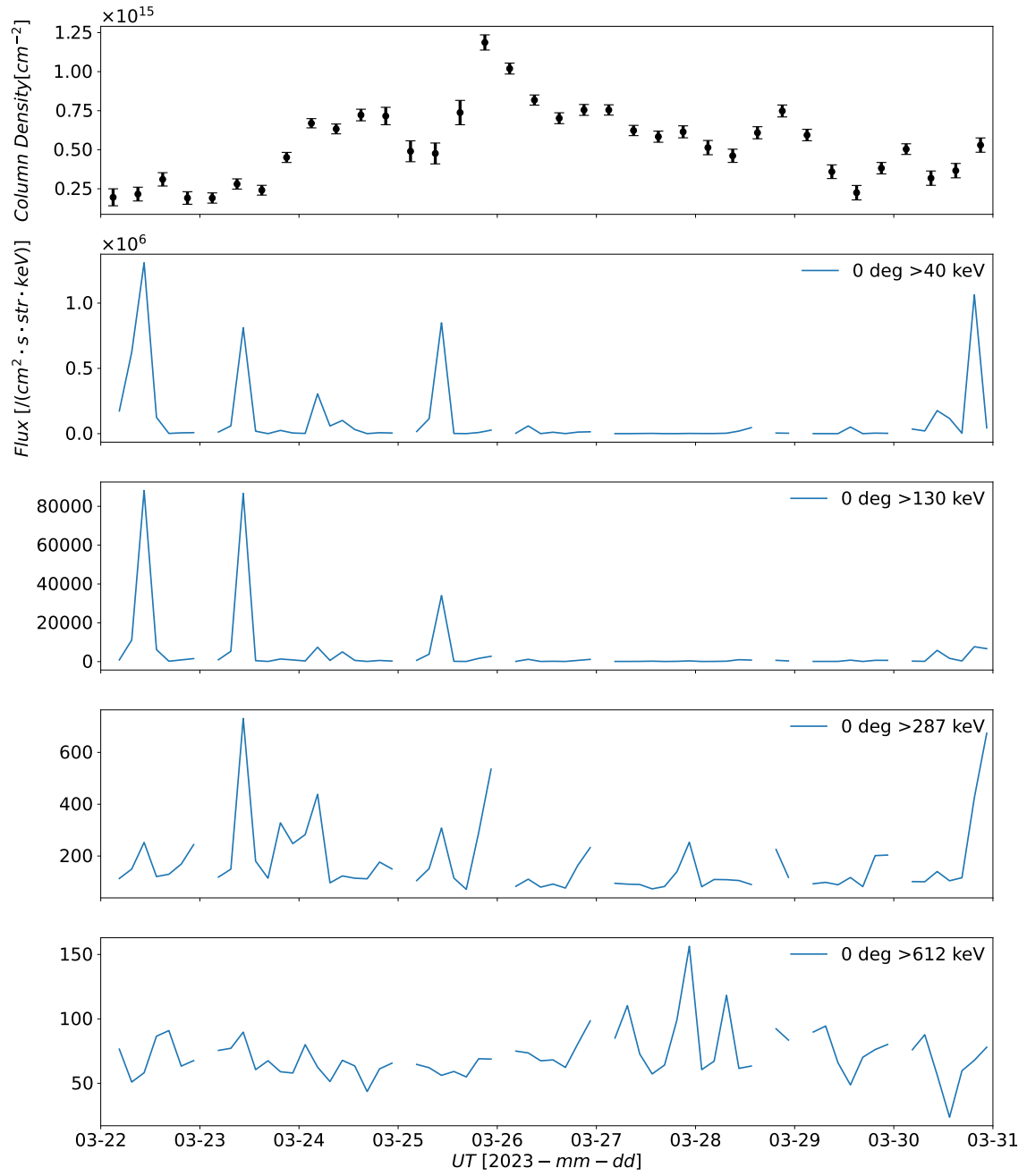


図 5.6: 昭和基地における柱密度（1 段目。図 4.2 と同様）と電子フラックスデータ（2-5 段目）との比較

### 5.2.3 OMNI Data Set との比較

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、降り込む電子のソースとなる磁気圏と電離層の様子を調べることができる OMNI Data Set<sup>3)</sup>を用いた比較を行った (OMNI Data Set の詳細は付録 D)。トロムソと昭和基地における比較結果をそれぞれ図 5.7、図 5.8 に示す。ここで、SYM/H は Dst 指数の 1 分値に相当するものであり、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る [16,17]。昭和基地の解析した期間については AE 指数は 2024 年 2 月 28 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。

トロムソにおいては、柱密度の増加が確認された 2 つの期間 (2019 年 1 月 23 日～2019 年 1 月 27 日と 2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日) どちらにおいても、地球磁場の南北成分のゆらぎが確認できた。また、太陽風の速さも大きくなっており、AE 指数も何度も激しく値が上昇している。以上より、SYM/H (もしくは図 5.3 の Dst 指数) の値をみると磁気嵐としての規模に違いはあるが、対象の期間では高速太陽風が吹いており、サブストームが活発にあったことが考えられる。このことより、高速太陽風が到達した際に磁気圏の活動が活発となり、電子が降り込むことで NO の変動に影響を与えたと考えられる。また、2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日の期間においては、プロトンの密度も上昇していることが確認された。

昭和基地においては、磁気嵐の発生と対応して柱密度が増加した 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された。しかし、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 (もしくは図 5.4 の 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。このことより、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たと考えられる。また、この時期の磁場の振動の中心はわずかに (数 nT 程度) 南向きの状態において高速太陽風が到達しているが、同様な条件で電子フラックスの値が増加することが先行研究 [18] にて示されている。

---

3) [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html)

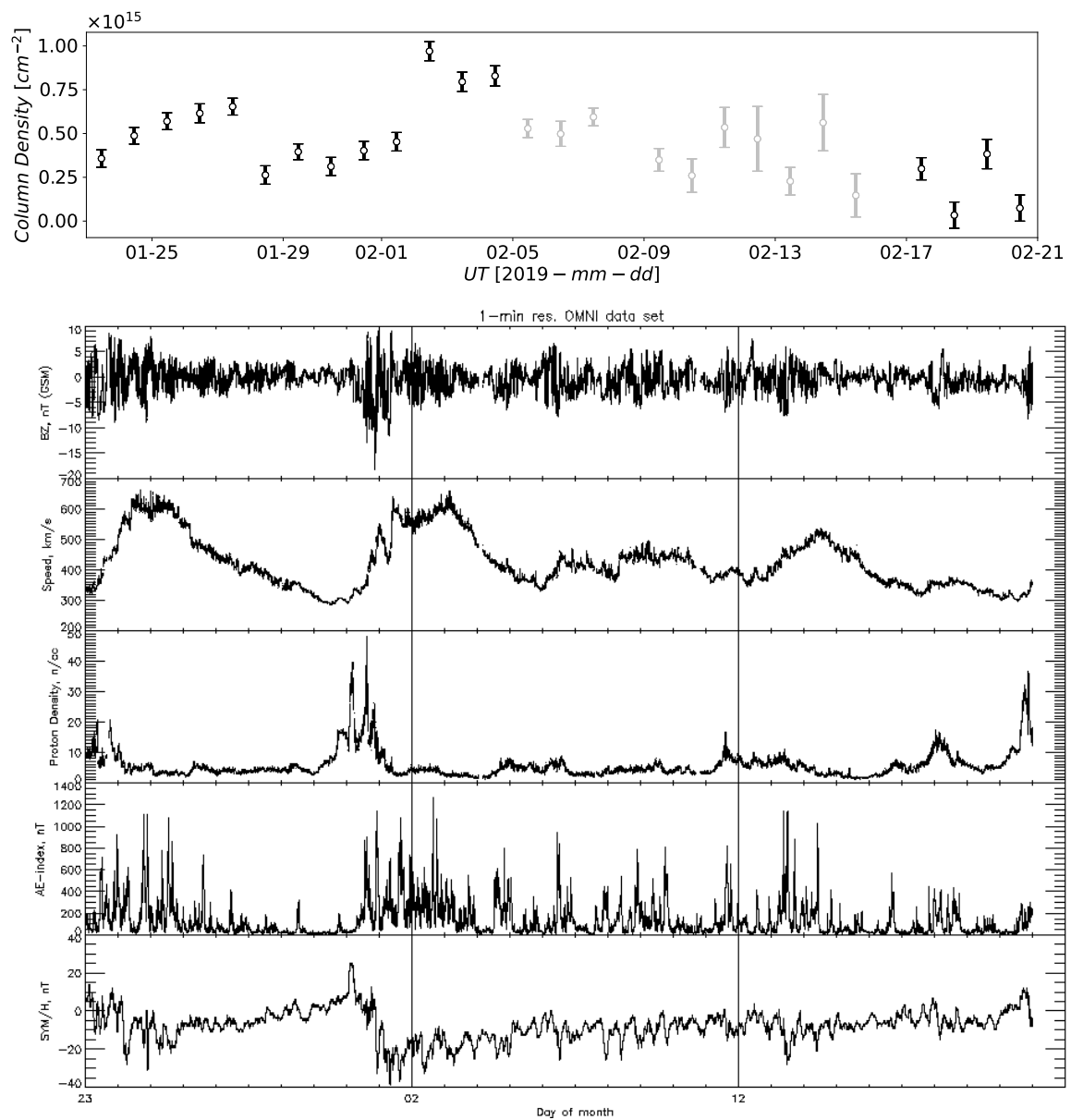


図 5.7: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と OMNI Data Set（2 段目:地球磁場の南北成分、3 段目:太陽風の速さ、4 段目:プロトン密度、5 段目:AE 指数、6 段目:SYM/H）との比較

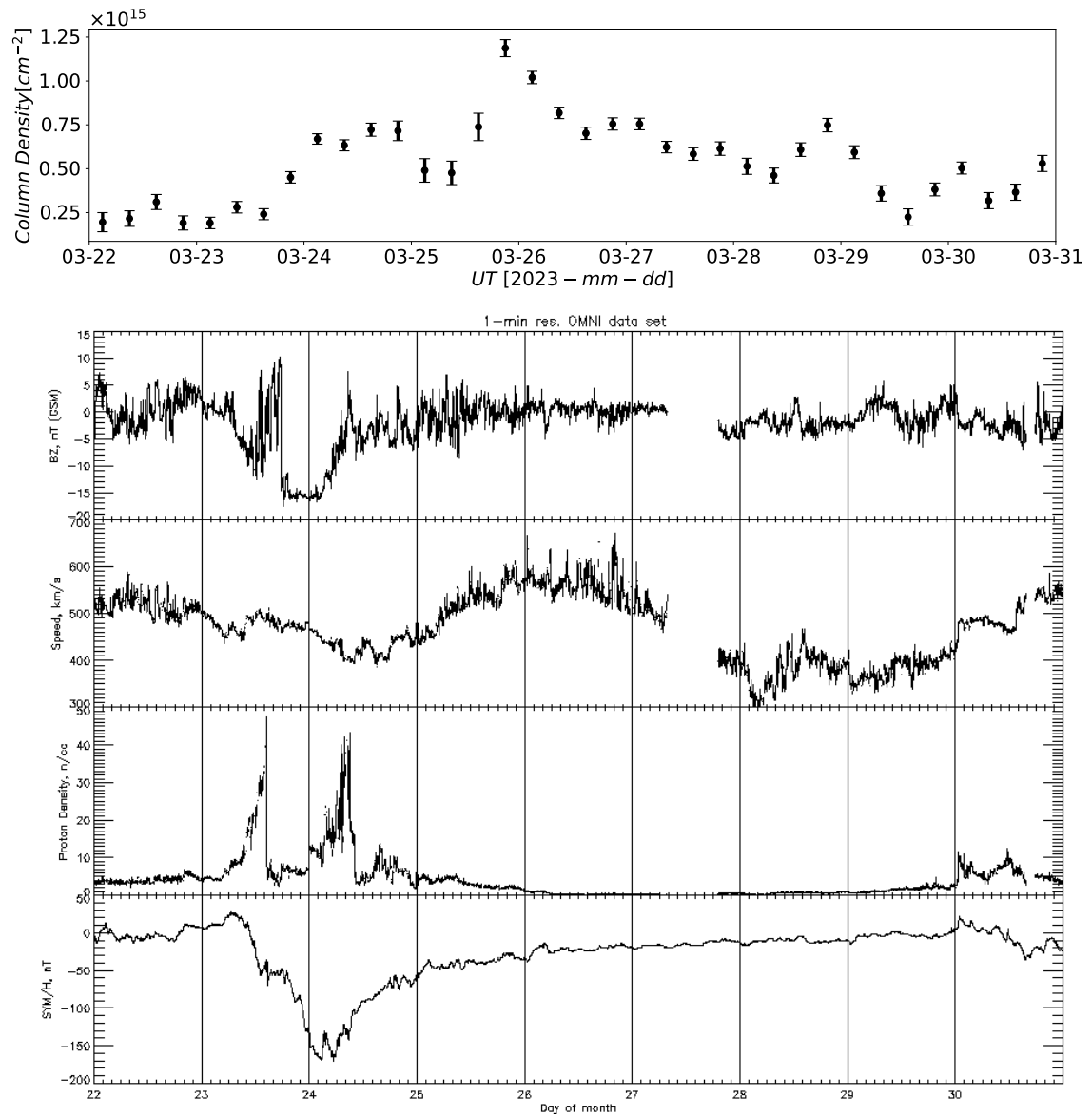


図 5.8: 昭和基地における柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と OMNI Data Set（2 段目:地球磁場の南北成分、3 段目:太陽風の速さ、4 段目:プロトン密度、5 段目:SYM/H）との比較

## 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<sub>x</sub> 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](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](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](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.