

ミリ波分光計を用いた北極域・南極域における
中層大気中の一酸化窒素分子変動の観測的研究

名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻
後藤宏文

目次

第 1 章	イントロダクション	2
1.1	オゾンの重要性とオゾン減少	2
1.2	先行研究の結果と課題	2
1.3	本研究の目的と研究手法	7
第 2 章	ミリ波観測法	8
2.1	観測手法	8
2.1.1	観測手法の概観と観測装置	8
2.1.2	電波強度のキャリブレーション	12
2.1.3	光学的厚み	12
2.1.4	周波数スイッチング	16
2.2	観測場所	19
2.2.1	ノルウェー・トロムソでの観測 (69.35°N, 19.14°E)	19
2.2.2	南極・昭和基地での観測 (69.00°S, 39.85°E)	20
第 3 章	ミリ波観測解析手法	22
3.1	光学的厚みデータを用いたスクリーニング	22
3.2	NO スペクトルデータに含まれるノイズによるスクリーニング	23
3.3	光学的厚みデータの補正 (Tromsø)	24
3.4	NO スペクトルデータのベースラインの補正	27
3.5	NO 柱密度 (Column Density) の導出	32
第 4 章	結果	33
4.1	ノルウェー・トロムソでの解析結果	33
4.2	南極・昭和基地での解析結果	33
第 5 章	考察	35
5.1	SOFIE データによって導出された NO 柱密度との比較	35
5.2	高エネルギー電子の降り込みとの比較	37
5.2.1	Dst 指数との比較	37
5.2.2	POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータとの比較	38
5.2.3	OMNI Web Data Set との比較	41
第 6 章	まとめ	40
付録 A	SOFIE	44
付録 B	Dst 指数	45
付録 C	POES/MetOp	46

付録 D	OMNI Web Data Set	47
------	-------------------	----

第5章 考察

5章では4章での結果との比較とを行う。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)において、SOFIE: (Solar Occultation for Ice Experiment。詳細は付録A)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、EPPの影響を調べるため、高エネルギー電子の降り込み(EPP: Energetic Electron Precipitation)との比較を行う。

5.1 SOFIE データによって導出された 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確認するため、SOFIEによるNOの密度の高度プロファイルデータを用いた。本研究では、トロムソの柱密度を導出した期間と同じ時期にトロムソ付近の緯度(およそ65 - 80°Nの範囲)で観測されたSOFIEのデータを用いた。その比較結果を図5.1に示す。なお、昭和基地においては、解析を行った期間のSOFIE観測データが2024年1月21日時点で公開されていないため比較を行っていない。ミリ波分光計を用いて導出

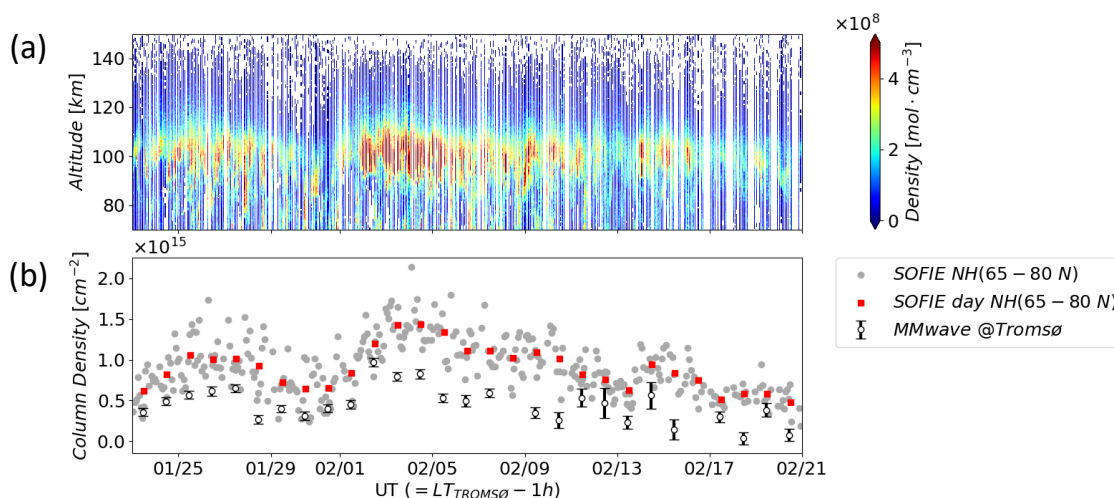


図 5.1: (a)SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータおよび (b) ミリ波分光計を用いて導出したトロムソの柱密度と SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータから導出した柱密度の比較 (エラーバー付きのプロットがミリ波データから導出した柱密度、グレーの丸形プロットが SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータから導出した柱密度、赤色の四角プロットが 1 日平均した SOFIE の柱密度)

した柱密度の増加が確認された2つの時期(2019年1月23日~2019年1月27日と2019年2月2日~2019年2月4日)において、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、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、各高度プロファイルデータごとに柱密度を導出した (図 5.1(b) のグレーの丸形プロット)。ミリ波分光計を用いて導出した柱密度との比較を行うため、SOFIE から導出した柱密度について 1 日平均した値を計算し、ミリ波分光計から導出した柱密度とのプロット間隔に合わせることで比較を行った。その結果、ミリ波分光計による柱密度が、SOFIE から導出した柱密度と傾向が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) より、第 1 項 A と第 2 項 T_{atm} は観測条件によらない定数であり、第 3 項 $\int T_{\text{NO}} d\nu$ のみを変数となるため、SOFIE から導出した柱密度とミリ波分光計による柱密度が定常倍であると仮定して比較を行った。その結果を図 5.2 に示す。ミリ波分光計から求めた柱密度と

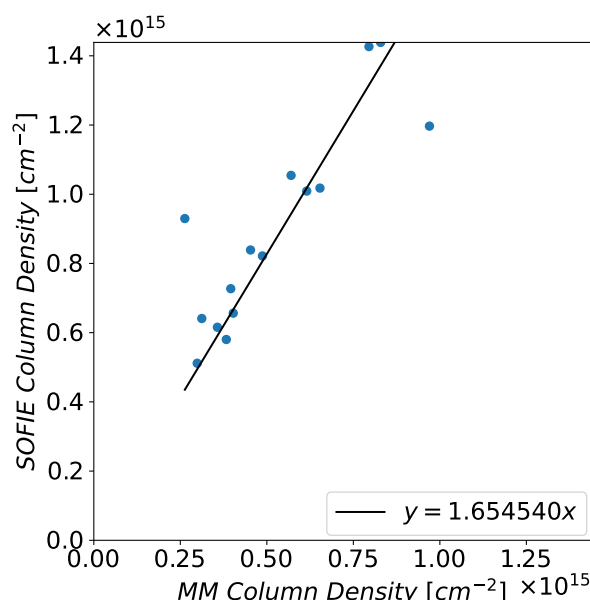


図 5.2: ミリ波分光計から求めた柱密度 (横軸) と SOFIE データから求めた柱密度の 1 日平均値 (縦軸) との散布図 (青色のプロット。黒線は一次近似による直線を示し、右下はその式を表している)

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とった。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) のプロットと、検知限界 ($2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) を下回るプロットは含めていない。加えて、散布図上にあるプロットについて切片を 0 にした状態で一次近似を行った (図 5.2 の黒線。近似した直線の式は図の右下に示す)。この結果より、SOFIE データによって導出された NO 柱密度はミリ波分光計データによって導出された柱密度のおよそ 1.65 倍の大きさであることが分かった。この原因の一部として、ミリ波分光計データによって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_{atm}) の値が妥当ではない可能性が考えられる。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。

5.2 高エネルギー電子の降り込みとの比較

次に、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 Web Data Set (5.2.3 節)

Dst 指数、POES/MetOp、OMNI Web Data Set の詳細はそれぞれ付録 B、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 指数のデータは地磁気世界資料センター京都 (WDC for Geomagnetism, Kyoto)¹⁾より調べた。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どのくらい打ち消すかを表したものである (詳細は付録 B)。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

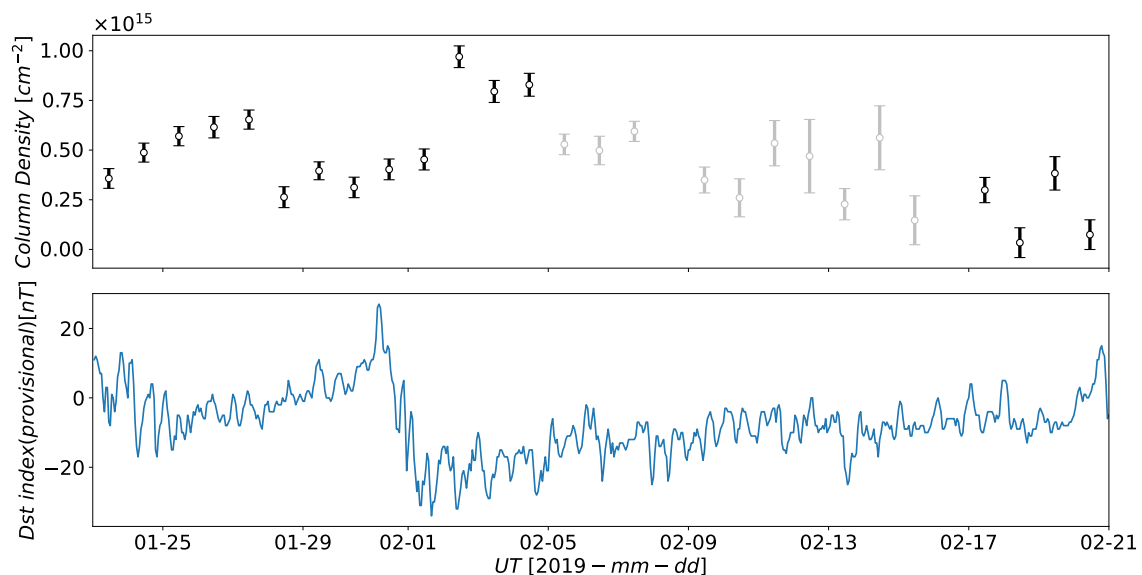


図 5.3: トロムソにおける柱密度 (1 段目。図 4.2 と同様) と Dst 指数 暫定値 (2 段目) との比較

認できた時期に対応して 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 2 日～2019 年 2 月 4 日、昭和基地においては 2023 年 3 月

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

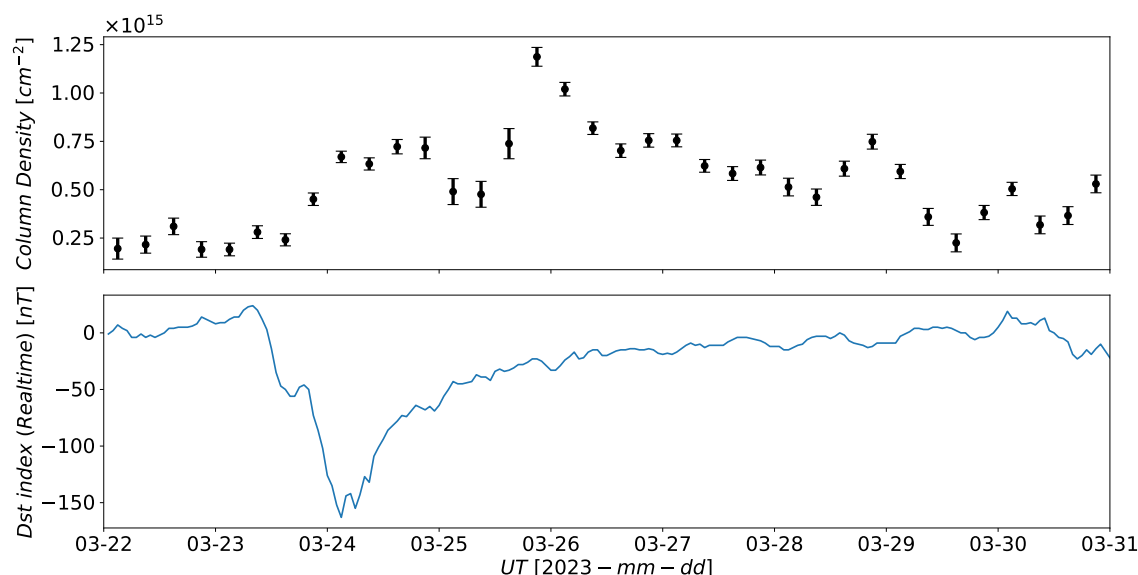


図 5.4: 昭和基地における柱密度（1 段目。図 4.2 と同様）と Dst 指数 速報値（2 段目）との比較

24 日の未明前後における NO の柱密度の増加に対応して、Dst 指数の急激な減少が確認できた。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た電子により 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時期において、Dst 指数の急激な減少は確認できなかった期間があった。

5.2.2 POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータとの比較

次に、実際に EEP がどの程度あったのか調べるため、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。観測場所周辺に降り込む電子のフラックスデータを調べるため、用いるデータの絞り込みを行った（詳細は付録 C）。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 ($> 40 \text{ keV}$, $> 130 \text{ keV}$, $> 287 \text{ keV}$, $> 612 \text{ keV}$) 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、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、1 対 1 で対応できるほど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時期（2019 年 2 月 2 日～2019 年 2 月 4 日）は電子フラックスの値も比較的大きく、 $> 287 \text{ keV}$, $> 612 \text{ keV}$ などのエネルギーが大きい電子フラックスにおいても値の上昇が確認できた。また、Dst 指数が比較的小さな減少があり、NO の柱密度の緩やかな増加があった時期（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 2019 年 2 月 2 日～2019 年 2 月 4 日と比べると小さいことが分かった。

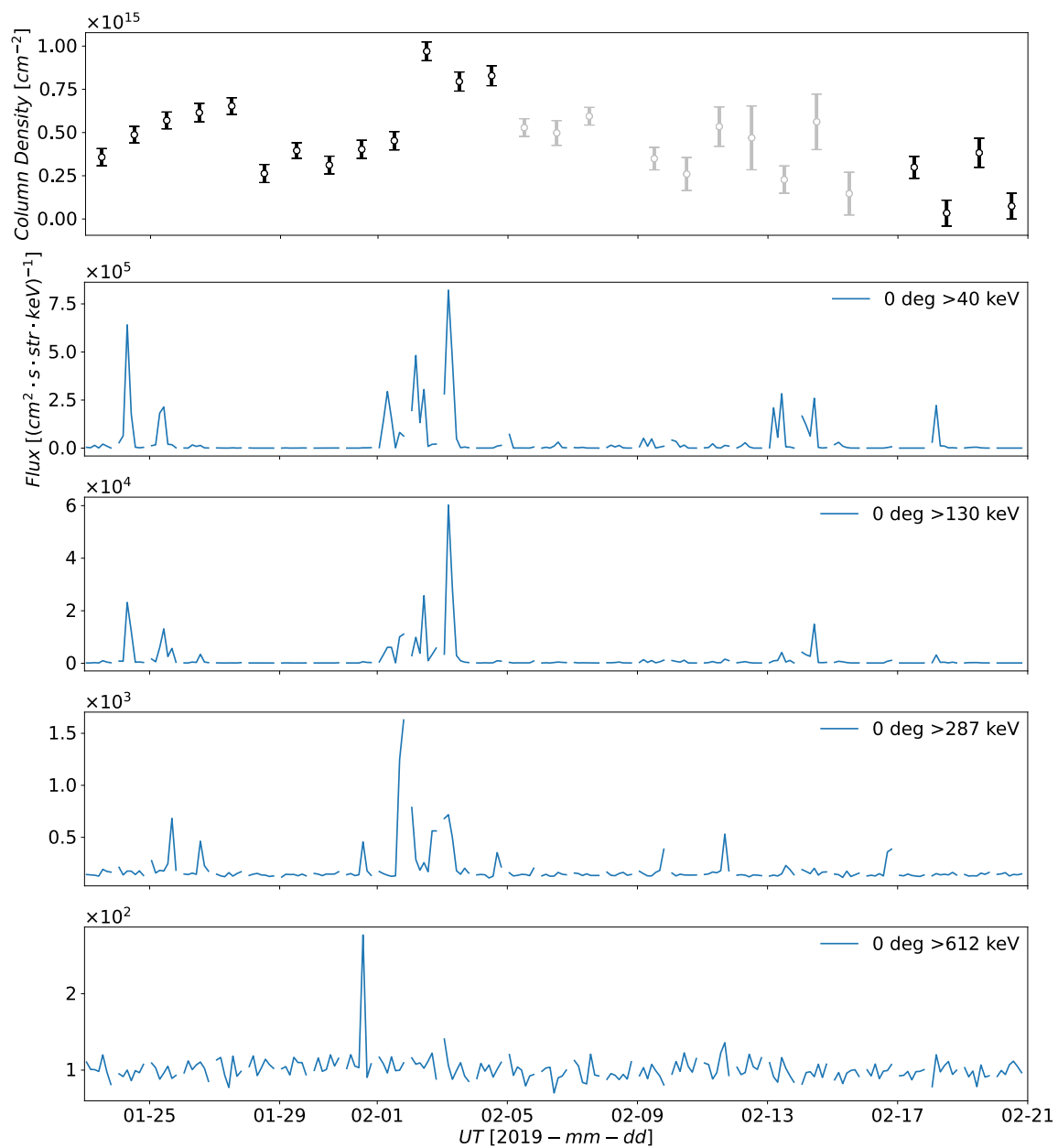


図 5.5: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と電子フラックスデータ（2-5 段目）との比較

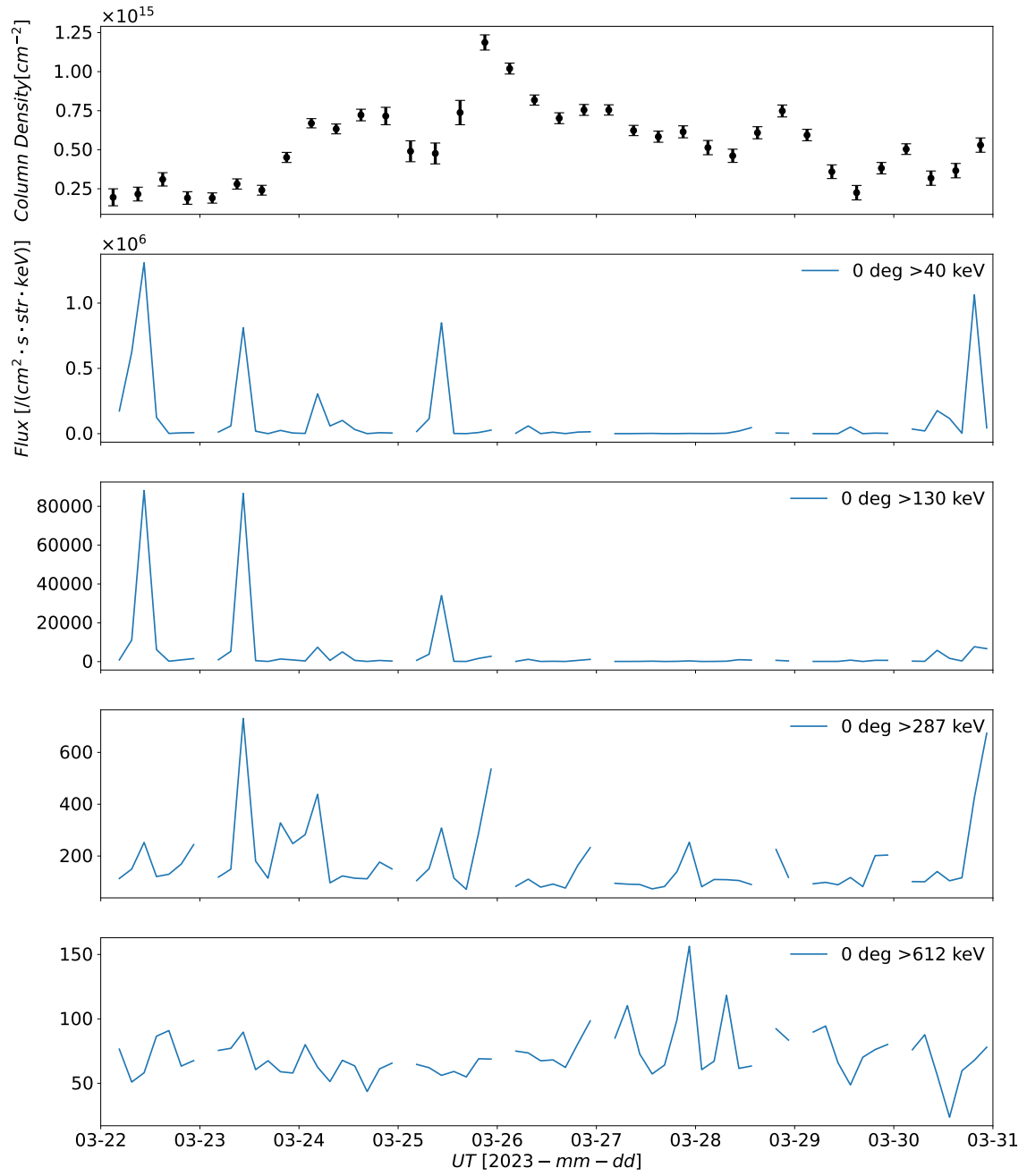


図 5.6: 昭和基地における柱密度（1 段目。図 4.2 と同様）と電子フラックスデータ（2-5 段目）との比較

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時期（2023 年 3 月 23 日 21 時～2023 年 3 月 24 日 3 時）は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時期（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。しかし、柱密度の増加が確認できなかった期間において、比較的小さいエネルギー（ $> 40 \text{ keV}$, $> 130 \text{ keV}$ ）における電子フラックスの増加がみられた。これは、電子が NO が存在する高度まで到達するのに十分なエネルギーをもっていないため、NO の増加があまり顕著でない可能性が考えられる。

以上より、磁気嵐以外にも他の要因で EEP の規模に影響を与えられ、NO の増加のしかたにも影響を与えている可能性がある。その要因を探るため、最後に OMNI Web Data Set を用いた比較を行った。

5.2.3 OMNI Web Data Set との比較

柱密度の増加に寄与しない電子フラックスの増加の要因を探るため、磁気圏と電離層の様子を調べることができる OMNI Web Data Set²⁾を用いた比較を行った（OMNI Web 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 つの時期（2019 年 1 月 23 日～2019 年 1 月 27 日と 2019 年 2 月 2 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、対象の時期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。2019 年 2 月 2 日～2019 年 2 月 4 日の時期においては、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。これは高速太陽風の影響で電子が加速され NO の増加につながった可能性が考えられる。

2) https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html

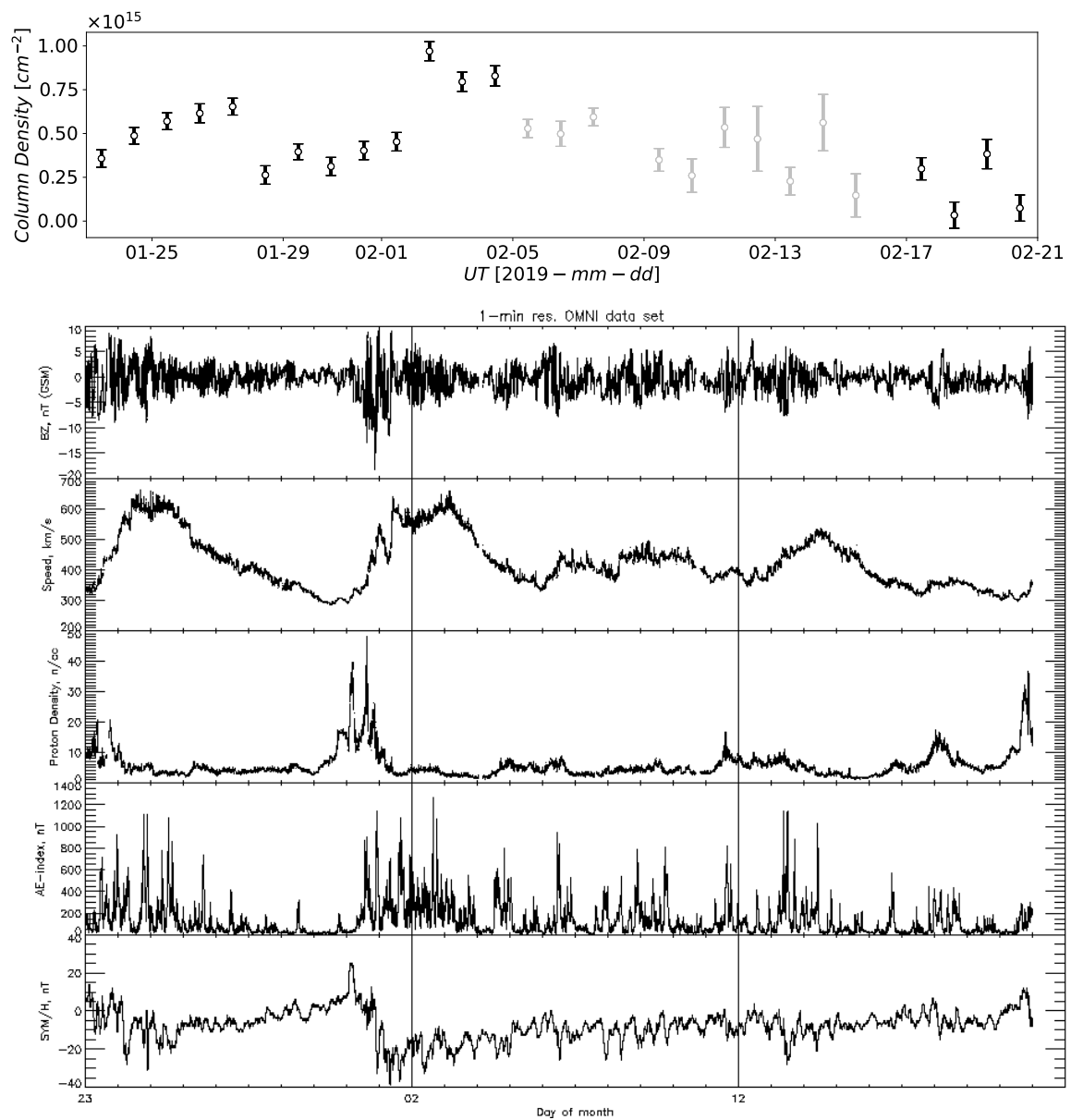


図 5.7: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と OMNI データ（2 段目:地球磁場の南北成分、3 段目:太陽風の速さ、4 段目:プロトン密度、5 段目:AE 指数、6 段目:SYM/H）との比較

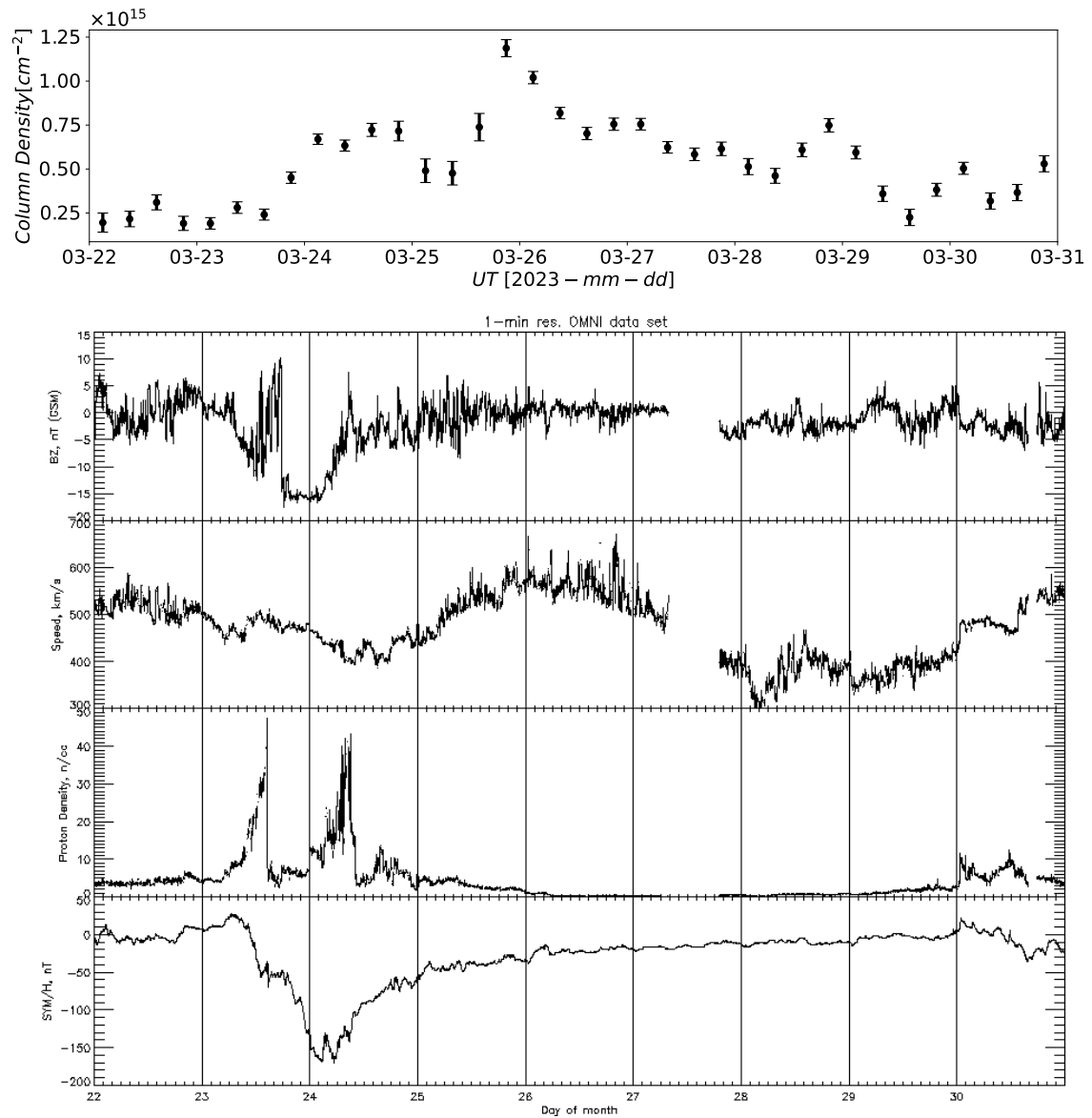


図 5.8: 昭和基地における柱密度（１段目。図 4.1 と同様）と OMNI データ（２段目:地球磁場の南北成分、３段目:太陽風の速さ、４段目:プロトン密度、５段目:SYM/H）との比較

参考文献

- [1] Eugene 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, Eugene Rozanov, and CJ Rodger. Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 114, No. A10, 2009.
- [3] Manuel 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] Yasuko Isono, Akira Mizuno, Tomoo Nagahama, Yoshizumi Miyoshi, Takuji Nakamura, Ryuho Kataoka, Masaki Tsutsumi, Mitsumu K Ejiri, Hitoshi Fujiwara, Hiroyuki 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] Yasuko Isono, Akira Mizuno, Tomoo Nagahama, Yoshizumi Miyoshi, Takuji Nakamura, Ryuho Kataoka, Masaki Tsutsumi, Mitsumu K Ejiri, Hitoshi Fujiwara, and Hiroyuki 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] Taku Nakajima, Kohei Haratani, Akira Mizuno, Kazuji Suzuki, Takafumi Kojima, Yoshinori Uzawa, Shin'ichiro Asayama, and Issei 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] Masahisa Sugiura and Toyohisa 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] Joe King, Natalia 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.