

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	40
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	48
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)衛星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、POES/MetOp衛星で観測された降り込み電子や地磁気擾乱指数との比較を行う。

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。使用した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°Nの範囲)で観測された高度ごとのNO密度である。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による観測データが2024年3月10日時点で公開されていないため、比較を行うことはできなかった。したがって、5.1節ではトロムソでの比較結果についてのみ述べる。

図5.1に、SOFIEによって得られたNO密度の高度プロファイル(a)と、ミリ波分光計によって得られたNO柱密度の時間変化(b)の白抜き丸プロット)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。

また、ミリ波分光計を用いて導出した柱密度とSOFIEのデータを直接比較をするため、SOFIEのNO密度の高度プロファイルを高度方向に足し合わせることで、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日平均した値が図5.1(b)の赤い四角プロットである。これらを比較した結果、ミリ波分光計による柱密度の時間変動の傾向は、SOFIEから導出した柱密度の傾向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値が大きいことも分かった。

ここで、図5.1(b)を見ると、ミリ波分光計を用いて導出した柱密度のほうが常に一定の割合で低く見積もっているように見えるため、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、ミリ波のデータで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。ここで、近似直線は、SOFIEから導出

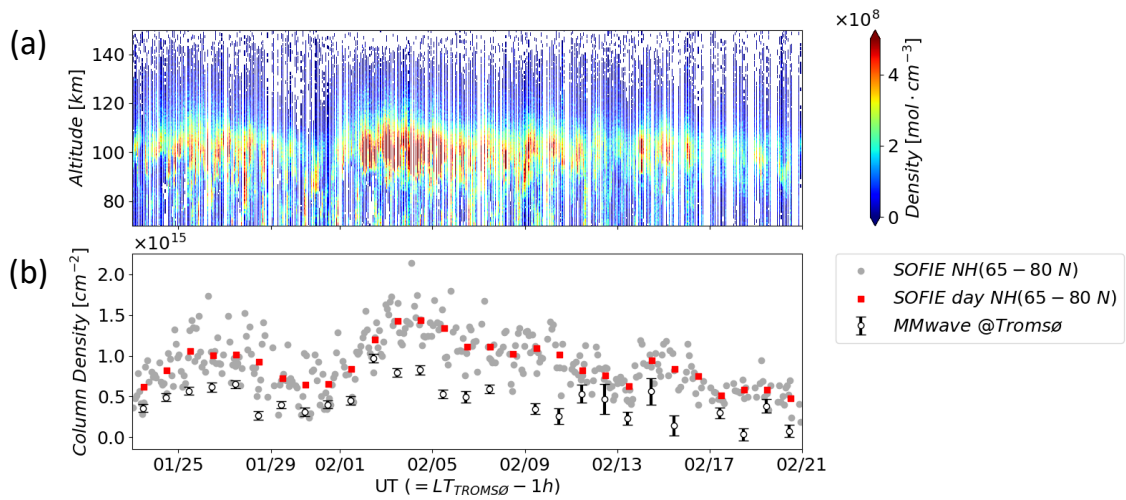


図 5.1: (a)SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータおよび (b) ミリ波分光計を用いて導出した Tromsø の柱密度と SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータから導出した柱密度の比較 (エラーバー付きのプロットがミリ波データから導出した柱密度、グレーの丸形プロットが SOFIE の NO 密度の高度プロファイルデータから導出した柱密度、赤色の四角プロットが 1 日平均した SOFIE の柱密度)

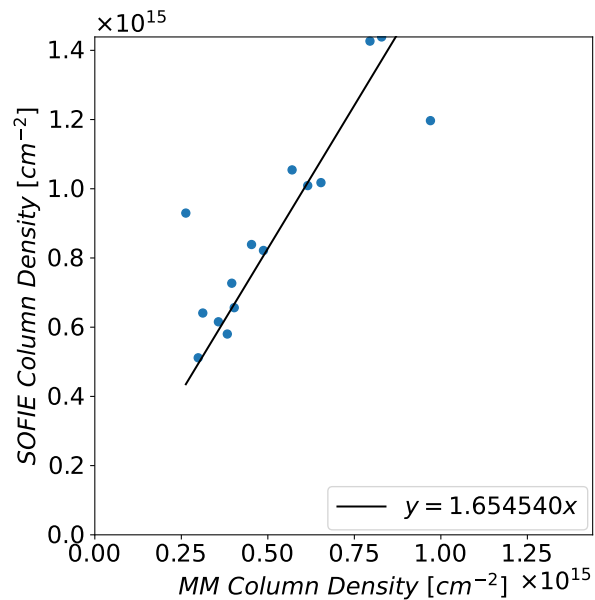


図 5.2: ミリ波分光計から求めた柱密度 (横軸) と SOFIE データから求めた柱密度の 1 日平均値 (縦軸) との散布図 (青色のプロット。黒線は一次近似による直線を示し、右下はその式を表している)

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する仮定より、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）。この図より、SOFIE による NO 柱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考えられるのは、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_{atm} ）の値が妥当ではない可能性である。そこで、NRLMSIS 2.0¹⁾を用いて、大気温度の妥当な値を調べた。NRLMSIS 2.0 とは地上から大気圏外までの経験的な大気モデルで、温度・8 種類の数密度・質量密度の平均的な観測挙動を表すものであり、大気温度の高度プロファイルを調べることができる。

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 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。しかし、これだけでは SOFIE で導出した NO の柱密度との値の差をすべて説明することはできない。大気温度を高度に依存せず一様と仮定していることもオフセットの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と考えている。これは今後の課題である。

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ため、全球的な傾向とトロムソでの局地的な傾向が異なる可能性もある。これに関しては、Box Trajectory 手法（放出される大気中の粒子を Box に見立てて、その Box の中でどのような化学反応が起きるか計算をし、その Box がどのように動いていくのかの解析を行う）を用いた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れば、それぞれで導出したトロムソでの局地的傾向を比較することができるので、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の指標となるデータとの比較を行った。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。

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

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、地磁気擾乱が起きた際にその値が負方向に変化する。これは、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数値的に表したものである（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）²⁾より調べた。

Dst 指数とトロムソにおける NO 柱密度との比較結果を図 5.3、昭和基地における比較結果を図 5.4 に示す。どちらの比較においても、NO の柱密度の増加が確認できた期間に対応して、Dst

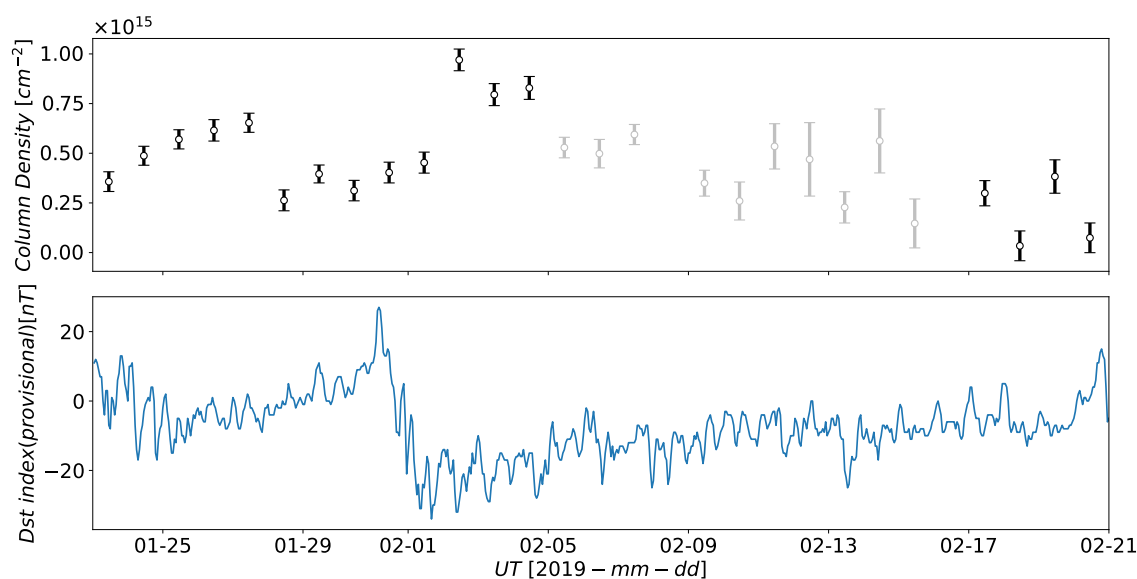


図 5.3: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.2 と同様）と Dst 指数 暫定値（2 段目）との比較

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、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（昭和基地における 2023 年 3 月 23 日 21 時～2023 年 3 月 24 日 3 時）については、Dst 指数の減少は確認できなかった。これは、地磁気擾乱による原因以外で NO の増加に寄与するものがあると考えられる（これについては以下の 5.2.2 節・5.2.3 節で述べる）。

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

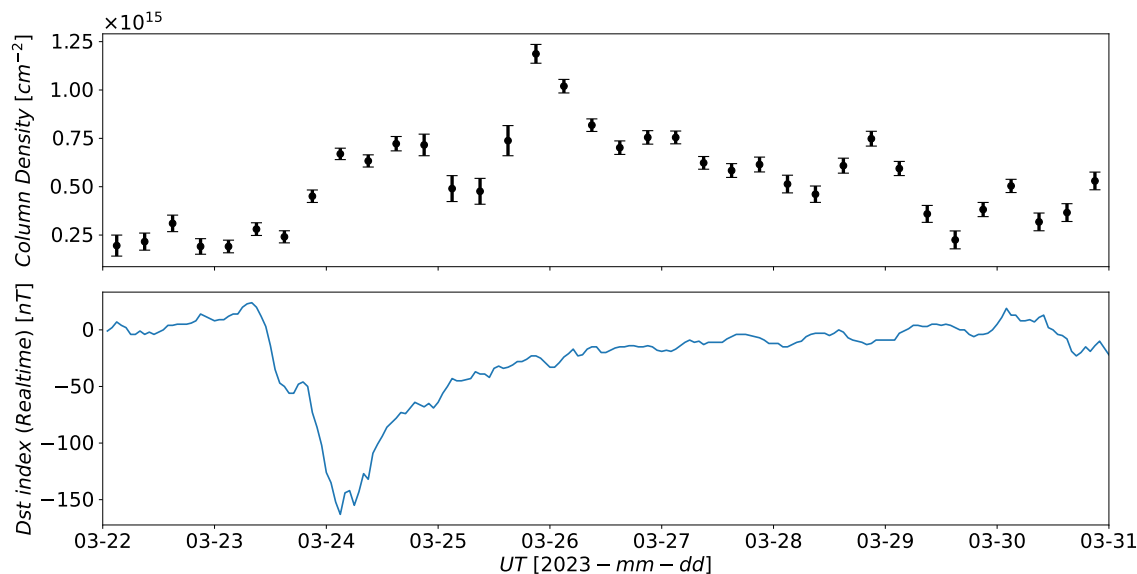


図 5.4: 昭和基地における柱密度（1 段目。図 4.2 と同様）と Dst 指数 速報値（2 段目）との比較

5.2.2 POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータとの比較

次に、電子の降り込みが起きているとき、どのようなエネルギーレンジの電子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との比較を行った。まず、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）。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。なお、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、それぞれ別のグラフで示してある。

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がみられる期間に対応した電子フラックスの増加がみられた。ただし、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ということが分かった。このことは、NO の寿命が数日程度であることを考えると想定範囲であると考えている。

まずトロムソのデータに関して詳しく見てみると、Dst 指数の急激な減少と同時に、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。これらは、5.2.1 節で予想したような EPP の影響によって NO が増加したと考えられる。

次に昭和基地のデータについては、Dst 指数の急激な減少と、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

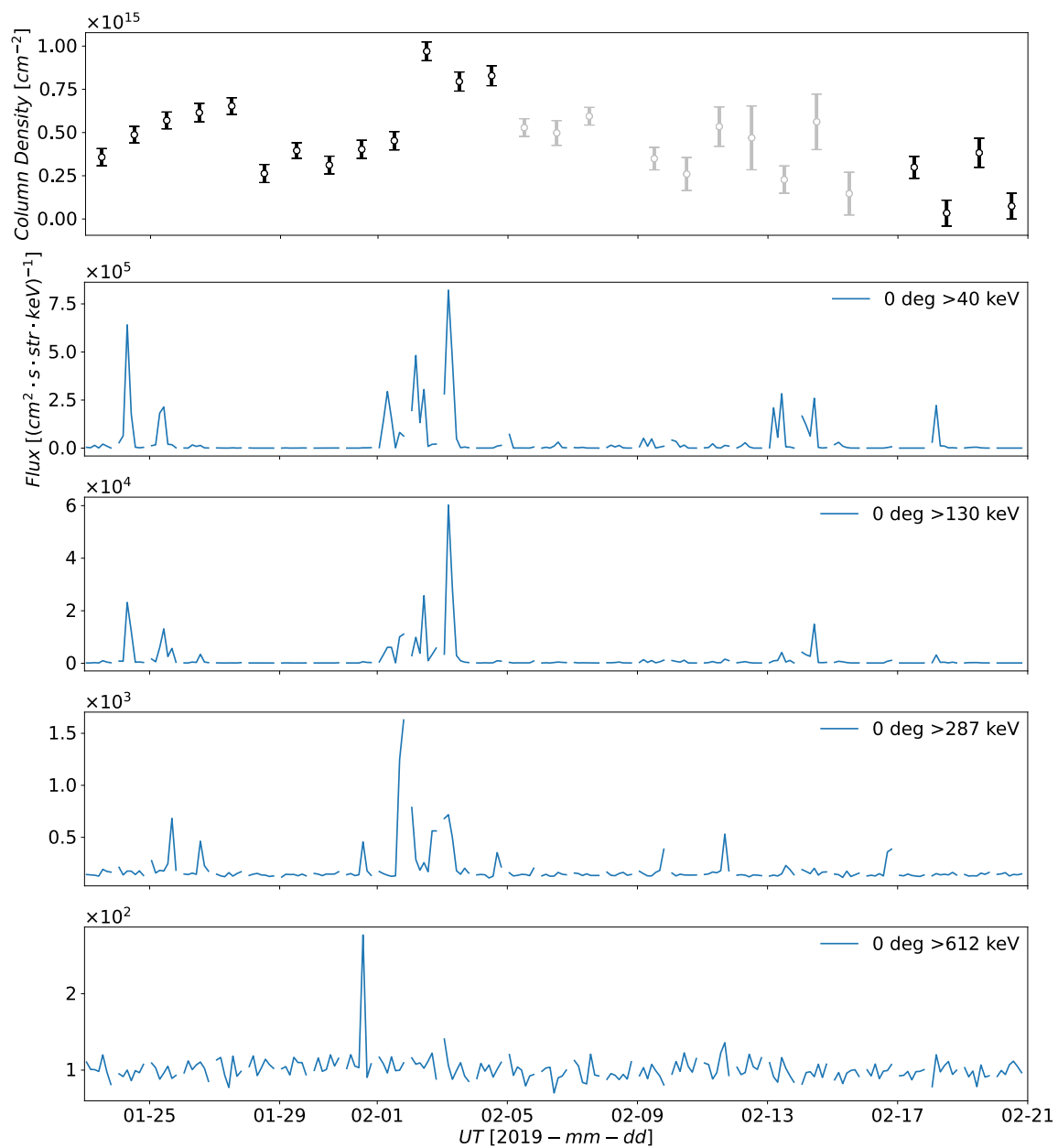


図 5.5: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と電子フラックスデータ（2-5 段目）との比較

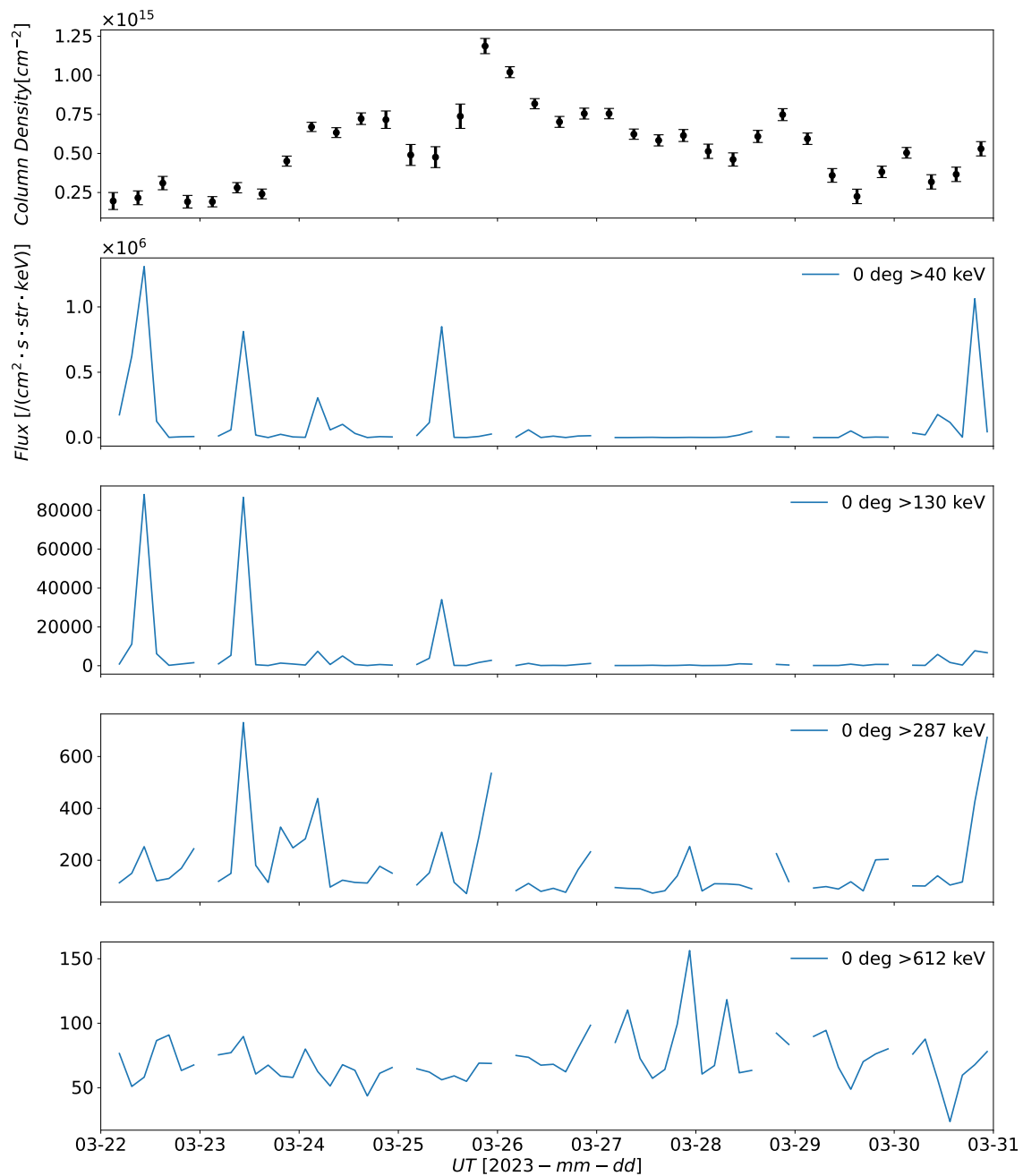


図 5.6: 昭和基地における柱密度（1 段目。図 4.2 と同様）と電子フラックスデータ（2-5 段目）との比較

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 3 種類の異なる結果を合わせて考えると、比較的大きい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。これは、理論的な予測（先行研究 [16]）とも矛盾しない（図 5.7）。

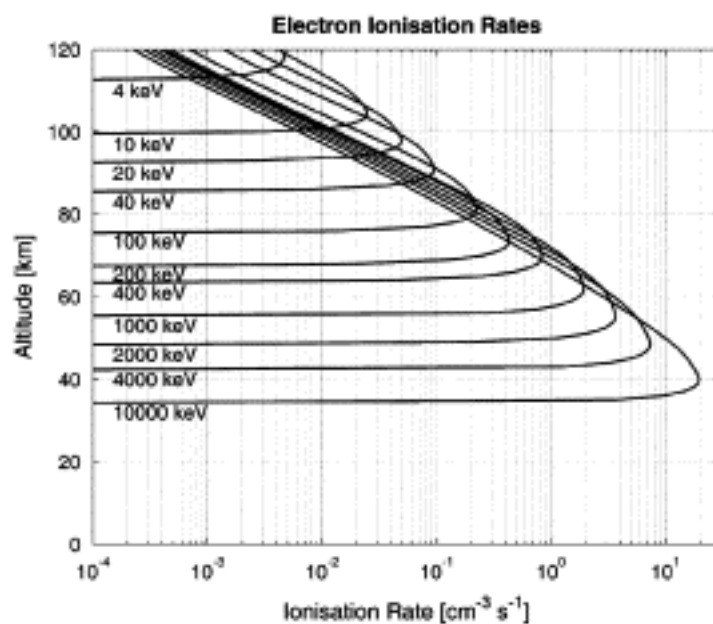


図 5.7: 電子のエネルギーと降り込み高度の対応。この図より > 287 keV の電子は高度 70 km 付近まで降り込むことがわかる（[16] より引用）。

これらのデータ比較から、NO の増加に影響を与える高エネルギー降り込み電子の起源を探るため、磁気圏での物理状態を調べる必要があると考えた。そのため、降り込む電子のソースとなる磁気圏と電離圏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結果を次節に述べる。

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圏の様子を調べることができる OMNI Data Set³⁾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 5.8、図 5.9 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 [17,18]。昭和基地の解析した期間については AE

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

指数は2024年3月10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。

まず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。

次に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 [19] にて示されている。

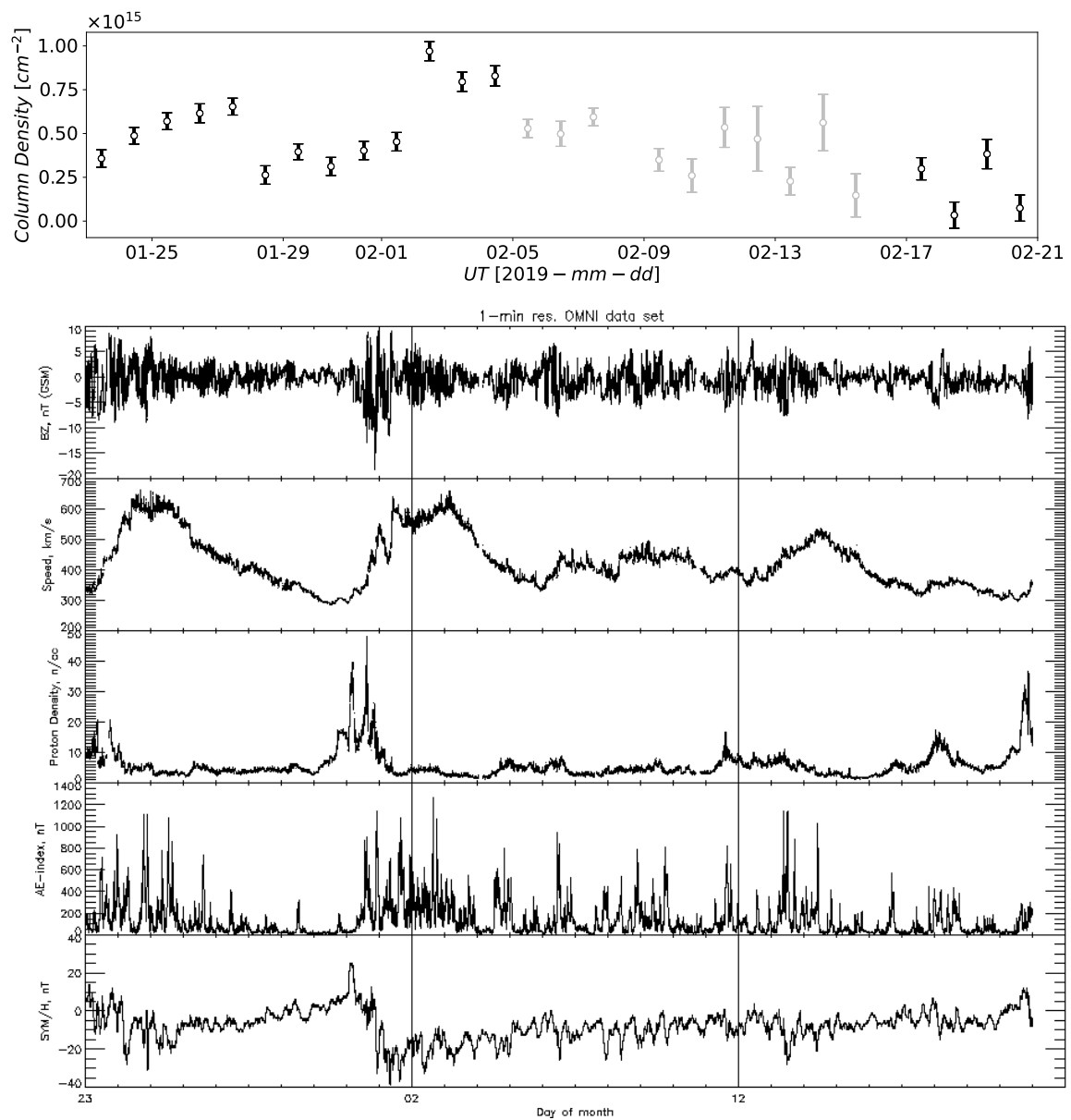


図 5.8: トロムソにおける柱密度（1 段目。図 4.1 と同様）と OMNI Data Set（2 段目:地球磁場の南北成分、3 段目:太陽風の速さ、4 段目:プロトン密度、5 段目:AE 指数、6 段目:SYM/H）との比較

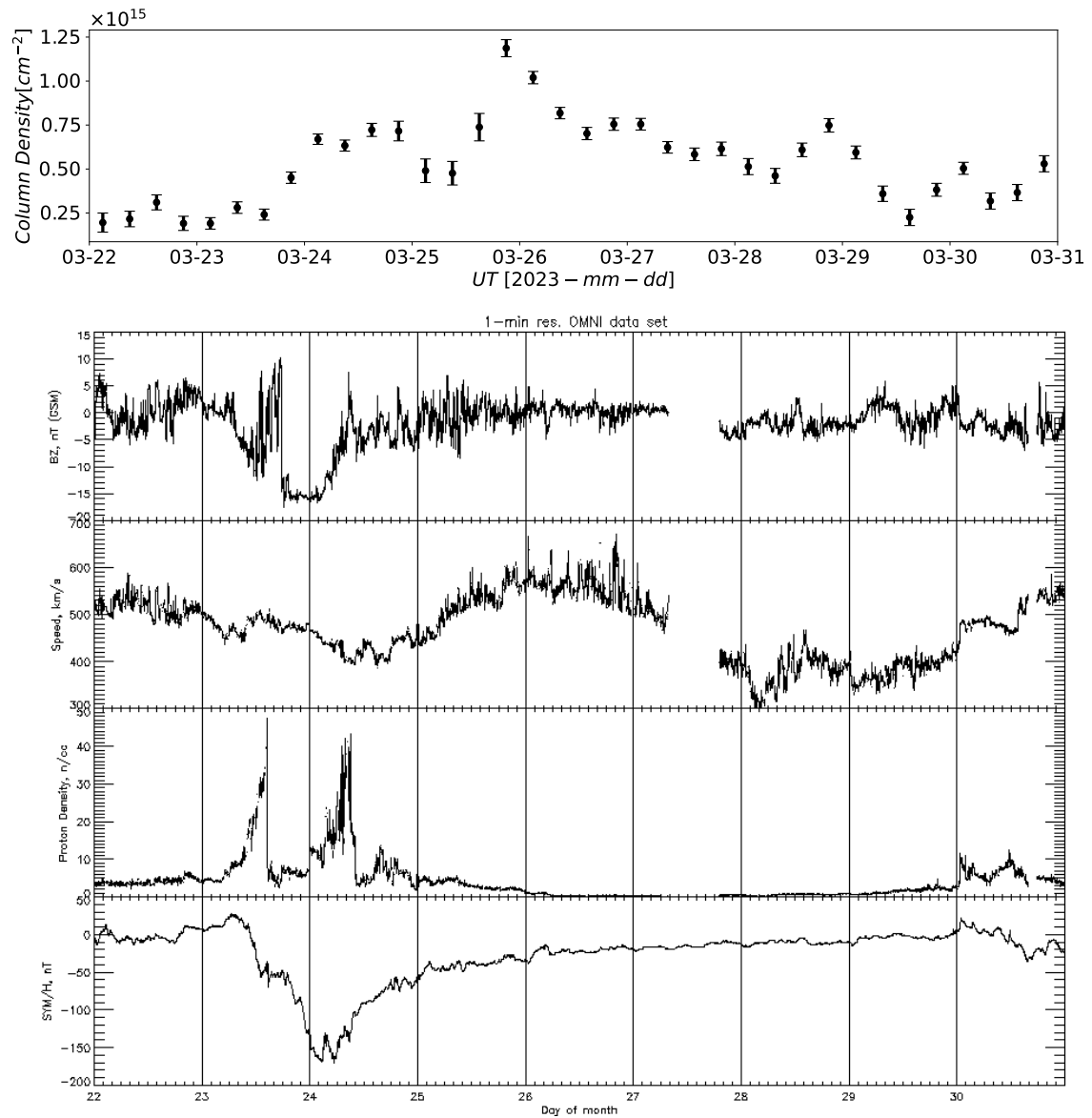


図 5.9: 昭和基地における柱密度（１段目。図 4.1 と同様）と OMNI Data Set（２段目:地球磁場の南北成分、３段目:太陽風の速さ、４段目:プロトン密度、５段目:SYM/H）との比較

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_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] E Turunen, PT Verronen, A Seppälä, CJ Rodger, MA Clilverd, J Tamminen, C Enell, and T Ulich. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71, No. 10-11, pp. 1176–1189, 2009.
 - [17] 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.
 - [18] 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.
 - [19] 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.
 - [20] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, M Nose, T Iyemori, M Sugiura, and T Kamei. Geomagnetic Dst index. doi:10.17593/14515-74000, 2015.
 - [21] M Sugiura and T Kamei. Equatorial Dst index 1957-1986. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>, 1986.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] 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_sd106-303.pdf, 2006.
 - [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] CT Russell. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic electrodynamics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184–196, 1971.