

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1章 イントロダクション

1章では、本研究の背景について述べる。まず1.1節では、地球大気でのオゾンの重要性和高エネルギー粒子の降り込みによるオゾンの減少について述べる。次に1.2節では、先行研究で明らかになったことと、その問題点について説明する。最後に1.3節では以上の内容を踏まえて本研究の目的について述べる。

1.1 オゾンの重要性和オゾン減少

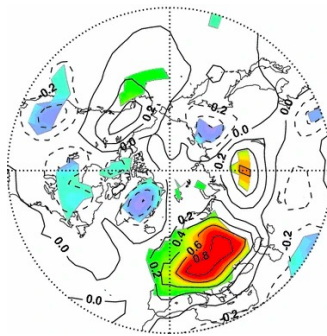
地球大気の大部分は窒素分子 N_2 と酸素分子 O_2 で占められているが、大気微量成分と呼ばれる N_2 と O_2 以外の大気分子も地球環境に影響を与えている。オゾン分子 O_3 もその大気微量成分の1つであり、紫外線を吸収し、大気中で熱源として働き大気温度に影響を与える。そして、 O_3 の変動によって大気の放射バランスが変わり、地上の気候や気象に影響を与える可能性が指摘されている [1,2]。これまで、冷媒などに用いられてきたフロンガスなどの人為的な原因による O_3 の破壊および変動に着目した研究は行われてきた。しかし、自然現象による O_3 の変動現象も知られている。その中でも、とくに太陽活動に伴う高エネルギー粒子の降り込み (EPP: Energetic Particle Precipitation) の影響による O_3 の変動に関しては、シミュレーション結果と観測結果には大きな開きがあるため、十分な観測的理解には達していない (図 1.1)。

そこで我々の研究グループでは、EPP の影響による O_3 の変動を観測的に明らかにすることを目的の1つとして研究を行っている。EPP の影響による O_3 の変動は、図 1.2 のようなシナリオが考えられている [1]。まず EPP が起きると、それによって上部中間圏～熱圏の高度で NO_x と呼ばれる一酸化窒素 NO や二酸化窒素 NO_2 が生成される。それが大気の鉛直輸送によって成層圏・中間圏に輸送されることにより、図 1.1 の反応式で表されるように O_3 の破壊サイクル反応を起こす。

1.2 先行研究の結果と課題

先行研究では EPP によって NO_x が増加し、それが O_3 の変動に影響を与えていることが MIPAS による衛星観測のデータにて時間分解能が1日ではあるが示されている (図 1.3) [3]。2003年10月28日に EPP があったが、その後に NO_x の増加が確認されており、 NO_x の増加があった領域において O_3 の減少が確認できる。MIPAS は太陽同期軌道を周回する衛星であり、リム観測で大気分子観測を行う衛星である。このような衛星観測はこの図で示されるように全球的な観測を行うことには向いているが、衛星軌道の特性により時間分解能は1日と比較的悪く、ある一地点における高時間分解能かつ連続的な観測には向いていないという課題があった。その課題を克服するため、我々の研究グループではミリ波分光計 (観測手法の詳細は2章で述べる) を用いた観測を行って

(a)



(b)

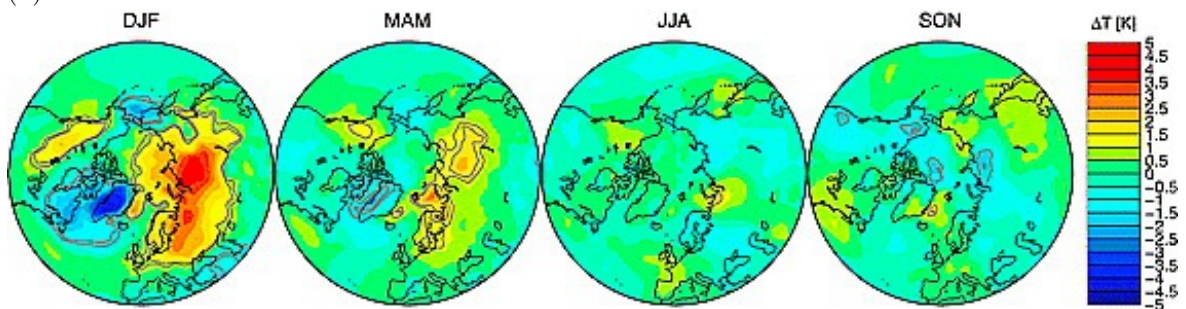


図 1.1: EPP 時の地表温度の変化 ΔT [K]。シュミレーション結果と観測結果の両方に地表温度の上昇が確認できるが、上昇のピークの値に差がある。(a) シミュレーション結果（最大で 0.8 K の増加、[1] より引用）(b) 観測データに基づいた統計結果（最大で 5 K の増加、[2] より引用）

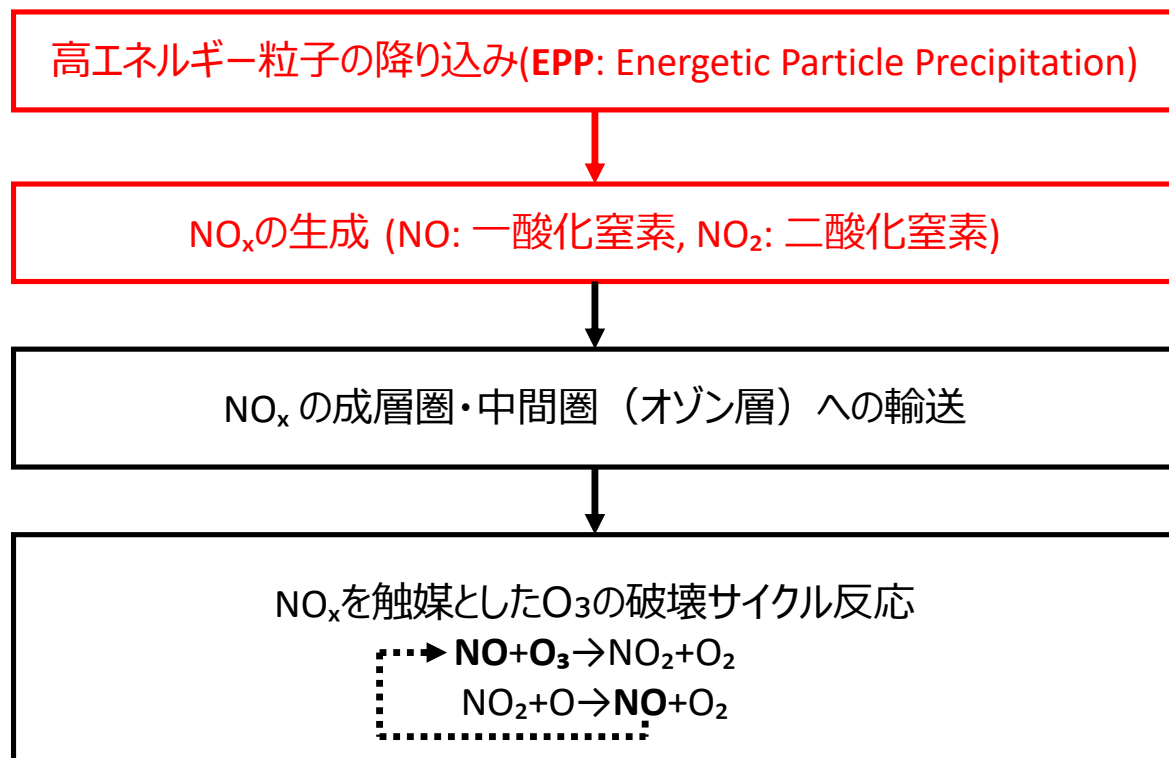


図 1.2: EPP から O₃ 破壊までのフロー

いる。

ミリ波分光を用いた地上観測と衛星観測は相補的な関係にあるため、必要に応じて衛星観測のデータを補足的に用いる。次に、我々の研究グループが行ったミリ波分光計を用いたこれまでの研究について紹介する。我々は、2011 年から南極昭和基地でミリ波分光計による O₃ と NO の地上観測を行っている。図 1.4 は、2012 年から 2013 年までの観測による NO の柱密度の時間変動の結果である [4]。横軸が時系列になっていて、エラーバー付きのプロットは NO の柱密度を示しており 1 日 1 プロットである。背景の紫色の影の部分は、高度 100 km におけるそれぞれの日で太陽が当たっていない時間の長さを表している。この結果より、季節変化にともなう長期的な変動のほか、冬期（4 月～8 月頃）には 4 日程度の顕著な短期的変動が確認できた。この短期的な変動は、EPP にともなう現象であると考えられる。しかし一方で、NO は光解離するため、夏（10 月～翌年 2 月頃）においては太陽光による影響も考慮に入れる必要がある。そのため、夏においては EPP イベントの際に、NO の増加と、光解離による NO の減少が同時に起きるため、光解離の影響と EPP の影響は切り分けることができなかった（図 1.4 の紫色の影の部分がない時期のプロット。エラーバーの範囲を超えた顕著な短期変動は確認できない）。以上のことを踏まえて、先行研究での衛星観測とミリ波分光計での地上観測で明らかになったことと、それらの課題点についてまとめる。

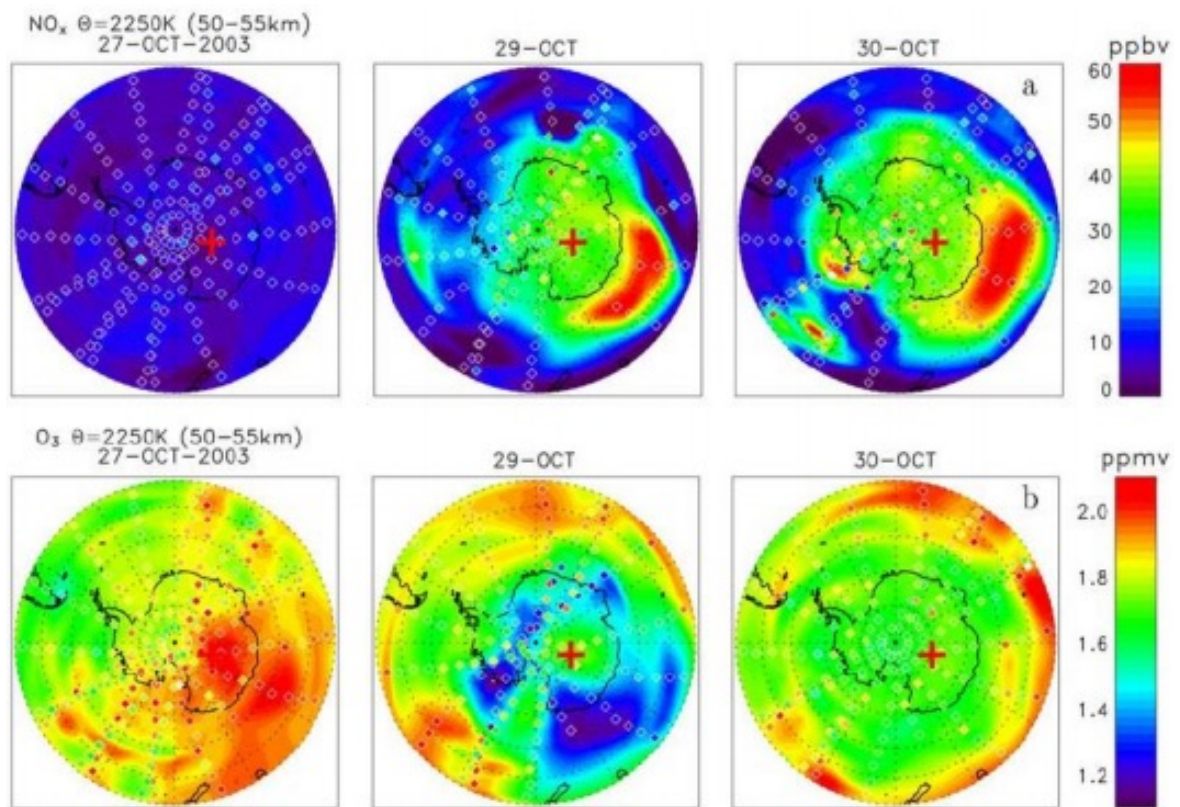


図 1.3: EPP イベントの前後での南半球の高度 50 – 55 km における NO_x と O_3 の変動（[3] より引用）

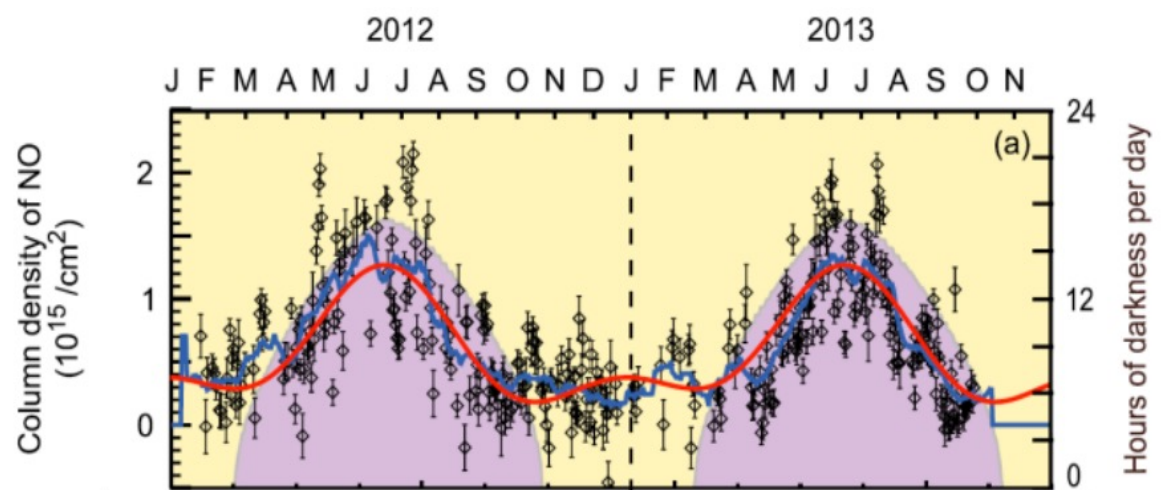


図 1.4: ミリ波分光計を用いた観測による南極・昭和基地での NO の変動（エラーバー付きのプロットは NO の柱密度を示しており 1 日 1 プロットである。紫色の影の部分、高度 100 km におけるそれぞれの日で太陽が当たっていない時間を表している。青色の線は 31 日間の移動平均、赤色の線は年周期成分と半年周期成分からなる正弦波によるフィッティングを行ったもの。[4] より引用）

- 明らかになった点
 - ミリ波分光を用いた地上観測（南極・昭和基地）
 - * 季節にともなう NO の長期的変動
 - * EPP に伴う NO の増加
 - 衛星観測
 - * EPP に伴う高度 50 km 付近のグローバルな NO の増加
 - * NO の増加した領域での O₃ の減少
- 課題点
 - ミリ波分光計を用いた地上観測（南極・昭和基地）
 - * 夏の NO の短期変動の確認が難しい
 - 衛星観測
 - * 定点での連続的な観測が難しい

1.3 節では、これらの課題点を踏まえた本研究の目的について述べていく。

1.3 本研究の目的と研究手法

本研究では、図 1.2 で示した EPP による O₃ 破壊現象のフローの中で、まずは上の 2 つの関係の解明に取り組んだ（図 1.5 中の赤枠）。EPP については、Dst 指数と呼ばれる地磁気擾乱の大きさを表す指数と衛星観測による電子フラックスデータから現象の同定を行い、その規模などの特性を調べた。加えて、NASA が提供している OMNI Data Set を用いて、電子フラックスの増加の原因となる事象が何かを調べた。NO_x については、ミリ波観測による NO のスペクトルデータから柱密度を導出し、その時間変動について調べた。最後に、これらの関係性について調べることで、EPP がどのように NO の変動に影響を与えているかについて明らかにする。

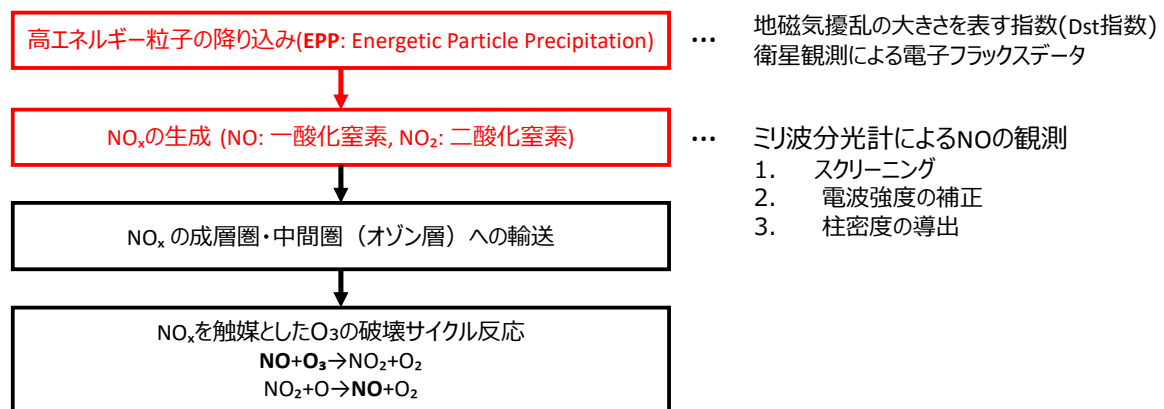


図 1.5: EPP による O₃ 破壊現象の流れと本研究の目的・手法との対応

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.