

X 線天文衛星「すざく」の昼地球観測データを用いた地球超高層大気の長期変動調査

埼玉大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻 物理学 PG
宇宙物理実験研究室
令和 6 年度修了

学籍番号 23MS105
山脇鷹也

2025 年 2 月 19 日

目次

第 1 章	序論	1
1.1	地球超高層大気	1
1.1.1	地球大気の構造	1
1.1.2	太陽放射の影響	3
1.1.3	太陽面現象と活動周期	5
1.2	放射線と物質の相互作用	7
1.2.1	光電吸収	7
1.2.2	Compton 散乱	8
1.3	地球大気モデル	9
1.3.1	NRLMSIS	9
1.3.2	SAMI2	9
1.4	熱圏の物理	10
1.4.1	組成	10
1.4.2	熱構造	10
1.4.3	熱圏の観測	12
1.5	本研究の目的	14
第 2 章	X 線天文衛星「すざく」	15
2.1	概要	15
2.2	X 線 CCD カメラ XIS	16
2.2.1	X 線 CCD カメラの原理と構造	16
2.2.2	電荷注入機能 (Spaced-Row Charge Injection; SCI)	18
2.2.3	Event threshold, Split threshold	19
2.2.4	Grade 判定法	20
2.3	昼地球観測	22
第 3 章	超高層大気の観測と解析	23
3.1	データリダクション	23
3.2	データ解析	24
3.2.1	イベント抽出	24
3.2.2	バックグラウンド	24
3.2.3	レスポンスファイルの作成	25

3.2.4	スペクトル解析	26
3.3	解析結果	29
3.3.1	窒素・酸素輝線強度	29
3.3.2	酸素/窒素の Flux 比	35
3.4	XIS の系統誤差評価	38
3.4.1	電荷注入機能の系統誤差	39
3.4.2	Grade 分岐比	44
3.4.3	ダークレベルの補正の評価	48
第 4 章	議論	49
4.1	緯度・ローカルタイム依存性	50
4.2	太陽活動 11 年周期依存性	57
4.2.1	窒素・酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関	58
4.2.2	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関	61
4.3	Total Electron Content	69
第 5 章	まとめ	73
付録 A	解析に用いたすざく観測データ	74
付録 B	Event threshold を下げた FI-CCD スペクトル	80
付録 C	酸素/窒素 Flux 比の季節依存性	82
付録 D	酸素/窒素 Flux 比のローカルタイム依存性	95
参考文献		106

図目次

1.1	地球大気の構造	2
1.2	大気の窓	4
1.3	黒点相対数の長年変化	6
1.4	コンプトン散乱の模式図	8
1.5	MSIS・SAMI2 数密度の高度プロファイル	11
1.6	MSIS・SAMI2 大気温度の高度プロファイル	11
1.7	熱圏の組成・温度に関する観測機器	12
1.8	TIMED 衛星と地上観測による高度の測定範囲	13
2.1	「すざく」の概観	15
2.2	XIS の概観	16
2.3	MOS 構造	16
2.4	CCD の構造図	17
2.5	FI-CCD(実線) と BI-CCD(破線) の検出効率のエネルギー依存性	17
2.6	三相方式 CCD による電荷転送の概略図	18
2.7	Frame Transfer 方式の概略図	18
2.8	XIS FI チップの概略図	19
2.9	SCI 機能の概略図	19
2.10	較正用線源である ^{55}Fe のラインのピークと幅	20
2.11	Asca Grade	21
2.12	LEO 天文衛星の昼地球観測	22
3.1	高度ごとにイベントを抽出	25
3.2	OBS ID:100019030 108km の窒素・酸素輝線スペクトル	27
3.3	OBS ID:100019030 108km の窒素・酸素輝線スペクトル fitting 後	28
3.4	OBS ID:100019030 窒素・酸素 Flux の高度依存性	29
3.5	窒素輝線の大气 Limb 観測	29
3.6	窒素 Flux の長期変動: 高度108 km	30
3.7	酸素 Flux の長期変動: 高度108 km	30
3.8	窒素 Flux の長期変動: 高度120 km	30
3.9	酸素 Flux の長期変動: 高度120 km	31
3.10	窒素 Flux の長期変動: 高度132 km	31

3.11	酸素 Flux の長期変動: 高度132 km	31
3.12	窒素 Flux の長期変動: 高度144 km	32
3.13	酸素 Flux の長期変動: 高度144 km	32
3.14	窒素 Flux の長期変動: 高度156 km	32
3.15	酸素 Flux の長期変動: 高度156 km	33
3.16	窒素 Flux の長期変動: 高度168 km	33
3.17	酸素 Flux の長期変動: 高度168 km	33
3.18	窒素 Flux の長期変動: 高度180 km	34
3.19	酸素 Flux の長期変動: 高度180 km	34
3.20	窒素 Flux の長期変動: 高度192 km	34
3.21	酸素 Flux の長期変動: 高度192 km	35
3.22	OBS ID:100019030 酸素/窒素 Flux 比の高度依存性	35
3.23	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度108 km	36
3.24	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度120 km	36
3.25	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度132 km	36
3.26	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度144 km	37
3.27	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度156 km	37
3.28	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度168 km	37
3.29	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度180 km	38
3.30	酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度192 km	38
3.31	SCI 機能の運用期間	39
3.32	高度156 km における窒素輝線中心値の長期変動	40
3.33	高度156 km における酸素輝線中心値の長期変動	40
3.34	SCI 行前後 4 列を除いた Flux の長期変動	41
3.35	SCI 行前後 4 列を除いた酸素/窒素 Flux 比の長期変動	41
3.36	XIS0 の酸素 Flux の長期変動	42
3.37	XIS0 酸素 Flux(F_O^{XIS0}) と XIS1 酸素 Flux(F_O^{XIS1}) の相関	42
3.38	OBS ID:700007020 昼地球スペクトルと天体スペクトルの FI スペクトルと BI スペクトルの比較	43
3.39	MCG-6-30-15 のスペクトル抽出領域	44
3.40	BI-CCD と FI-CCD の酸素/窒素 Flux 比の長期変動	44
3.41	昼地球データの Grade 分岐比	45
3.42	天体データの Grade 分岐比	46
3.43	Grade0 イベントのみの高度156 km における Flux の長期変動	47
3.44	Grade0 Only: 高度156 km における酸素/窒素 Flux 比の長期変動	47
3.45	ダークレベルの補正	48
4.1	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度108 km	51
4.2	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度120 km	51
4.3	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度132 km	51

4.4	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度144 km	52
4.5	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度156 km	52
4.6	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度168 km	52
4.7	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度180 km	53
4.8	酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度192 km	53
4.9	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度108 km	54
4.10	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度120 km	54
4.11	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度132 km	55
4.12	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度144 km	55
4.13	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度156 km	55
4.14	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度168 km	56
4.15	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度180 km	56
4.16	酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度192 km	56
4.17	太陽 X 線 Flux(0.1–0.8 nm) の長期変動	57
4.18	GOES シリーズの運用期間	57
4.19	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度108 km	58
4.20	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度108 km	58
4.21	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度120 km	58
4.22	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度120 km	58
4.23	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度132 km	59
4.24	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度132 km	59
4.25	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度144 km	59
4.26	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度144 km	59
4.27	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度156 km	59
4.28	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度156 km	59
4.29	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度168 km	60
4.30	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度168 km	60
4.31	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度180 km	60
4.32	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度180 km	60
4.33	窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度192 km	60
4.34	酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関: 高度192 km	60
4.35	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度108 km	61
4.36	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度120 km	61
4.37	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度132 km	61
4.38	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度144 km	61
4.39	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度156 km	62
4.40	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度168 km	62
4.41	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度180 km	62
4.42	酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関: 高度192 km	62
4.43	各パラメータと太陽 X 線 Flux 間の相関係数	63

4.44	GUVI Disk の日平均・全球平均O/N ₂ と太陽 EUV Flux の散布図	64
4.45	F10.7cm フラックスに対するO/N ₂ と Reference Height の依存性	64
4.46	12 月至の太陽活動度が高い時 (赤実線) と低い時 (青点線) の全球平均O/N ₂	65
4.47	太陽活動極大期と極小期の数密度変動	67
4.48	GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) のO 数密度の時系列	68
4.49	GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) のO ₂ 数密度の時系列	68
4.50	GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) のN ₂ 数密度の時系列	68
4.51	GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) のO/N ₂ 数密度比の時系列	68
4.52	2014/04/16 18:00:00(UTC) の ATEC マップ	69
4.53	ATEC の長期変動	69
4.54	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関係数	70
4.55	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度108 km	71
4.56	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度120 km	71
4.57	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度132 km	71
4.58	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度144 km	71
4.59	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度156 km	71
4.60	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度168 km	71
4.61	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度180 km	72
4.62	酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関: 高度192 km	72

表目次

1.1	大気中での光学励起現象	7
1.2	MSIS の入力と出力パラメータ	9
1.3	SAMI の入力と出力パラメータ	9
1.4	現在運用中の高度約 100–200 km 間の大気温度・組成を観測する機器	13
2.1	XIS の性能	18
2.2	Event threshold	20
3.1	昼地球 ARF 作成入力パラメータ	26
3.2	OBS ID:100019030 108km の窒素・酸素ベストフィットパラメータ	28
3.3	ダークレベルの補正前後のベストフィットパラメータ	48
4.1	$\Sigma[\text{O}]/[\text{N}2]$ の先行研究	50
A.1	解析に用いた観測データ	74
B.1	解析に用いた観測データ	80
B.2	Event threshold を下げた OBS sequence を探査する構文	81

概要

地表から高度80 km 以上の領域を覆う地球大気は地球超高層大気と呼ばれ、宇宙空間から飛来する X 線はこの領域で主に酸素や窒素によって吸収され、蛍光 X 線を放射している。これらの蛍光 X 線は、超高層大気成分分析を研究する上で重要な情報源となる可能性がある。地球低軌道を周回する X 線天文衛星はその天体観測過程において、太陽に照らされた昼の地球を指向する時間が存在するため、天体観測ばかりでなく地球大気からの蛍光 X 線放射を捉えることで地球観測も行っている。本研究では X 線天文衛星「すざく」が2005 年9 月から2015 年6 月の運用停止まで約10 年に渡り地球大気の観測を行ったことに着目し、太陽活動の11 年周期に対する地球超高層大気の応答を調査した。

超高層大気の中でも高度約150 km 以上の観測には紫外線衛星が用いられ、遠紫外線大気光などから化学種の数密度が測定され、特に原子状酸素O と分子状窒素N₂ の柱数密度比 $\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ の変動がよく研究されてきた。一方、「すざく」による昼地球観測データには、地球大気的主要な構成物質である窒素及び酸素由来の分子・原子及び電離状態の総和の蛍光 X 線が確認できる。この輝線強度比からこれらの存在比を推定できる。「すざく」は第24 太陽周期の期間、窒素と酸素の存在比の変動を調べることが可能である。また、視線が地球の縁をかすめる観測に着目すれば、酸素・窒素存在比の高度分布の計測もできる。この2 つの性質を兼ね備えた観測装置は「すざく」のみである。また、X 線は紫外線よりも低い高度まで透過するため、紫外線観測よりも低高度の観測ができることも重要な特徴である。

本研究では、高度約100–200 km の区間を24 km 刻みに、窒素と酸素の輝線強度およびそれらの強度比の長期変動、その変動が太陽活動とどの程度相関しているのか調査した。その結果、調査を行った全ての高度区間で太陽 X 線フラックスと酸素・窒素の輝線強度に強い相関が見られ、「すざく」が観測した輝線強度は太陽活動の影響を強く受けることが分かった。さらに、酸素/窒素輝線強度比は太陽 X 線フラックスと共に増加することが分かった。この結果は、太陽活動の11 年周期が超高層大気中の酸素/窒素比をコントロールすることを示し、地球低軌道衛星による超高層大気の新たな観測方法の確立に繋がる成果である。

第 1 章

序論

1.1 地球超高層大気

大気とは、惑星や衛星の重力によって保持される気体を指し、その存在する領域を大気圏と呼ぶ。地球の超高層大気は一般的に高度80 km 以上の領域を指し、大気密度が著しく減少するため「宇宙空間」と定義される。この領域は弱電離プラズマで構成され、電離成分と中性成分はそれぞれ電離圏と熱圏として通常区別されて考えられる。

超高層大気は非常に動的な特性を持ち、上空からの(しばしば突発的な)太陽及び磁気圏の強制(e.g., Lu et al., 2016 [1]) や、下層大気からの気象学的強制(e.g., Liu, 2016 [2]; Sassi et al., 2019 [3]) によって駆動される。この領域の動態は、地上及び宇宙ベースの通信・航法技術の性能に直接影響を与える。さらに、この宇宙域には、地球低軌道に存在する気象衛星、通信衛星、全地球航法衛星、その他多くの運用衛星が含まれる。このため、超高層大気に変化が生じると、大気抵抗を介してこれらの衛星や、同領域内に漂う軌道デブリの軌道に直接影響を及ぼす可能性がある。2022 年 2 月には太陽フレアによる磁気嵐により、スペース X 社の「スターリンク」人工衛星 40 基以上が機能停止となった。このように宇宙ベース技術への依存度が増す中、超高層大気の気象や力学を科学的に理解し予測することは、極めて重要である [19]。

本節では熱圏、特に本研究のターゲット高度である約 100–200 km の環境や物理について扱う。

1.1.1 地球大気の構造

地球大気の構造を考えると、大気温度の鉛直分布の特性による定義や、組成・力学的特徴による定義、電子密度による定義などが存在する(図1.1)。本項では、これら大気構造について簡単にレビューする。

温度構造による分類

大気構造は大気温度による分類が一般的である。各領域は大気温度 T の高度 z に対する微分係数 β の正負によって、順次定義される。

$$\beta = -\frac{\partial T}{\partial z}$$

対流圏 ($\beta > 0$)

地表に最も近く、大部分の気象学的現象はこの対流圏の中で見られる。この領域は高度が上昇すると共に大気温度が下降し、最低温度が最初に現れる面を対流圏界面とよぶ。対流圏界面の高度は緯度及び季節により異なる。高緯度地方では約10 km、低緯度地方では17 km、平均14 km である。対流圏界面での

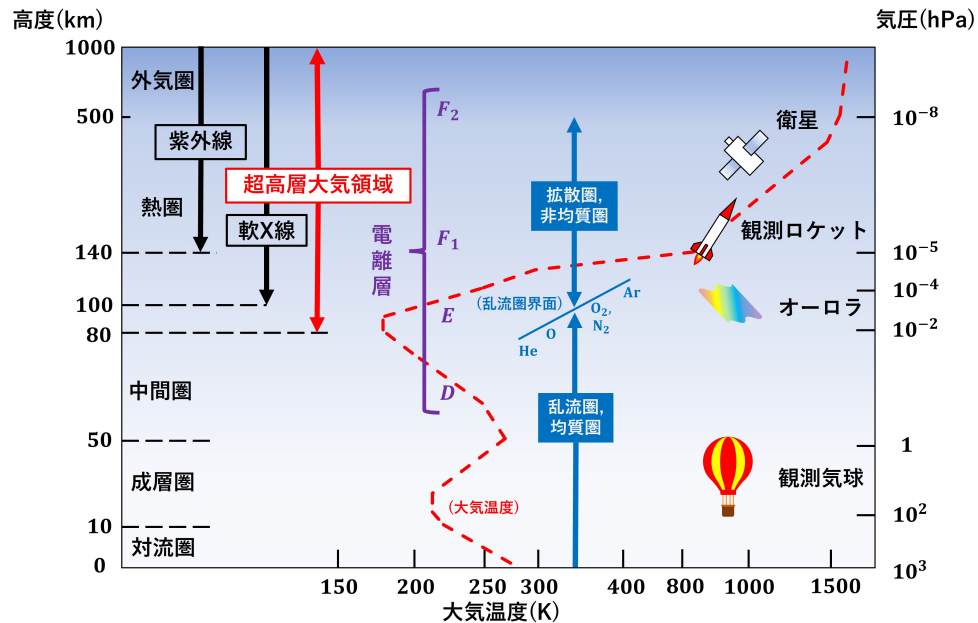


図1.1: 昼地球大気の構造。理科年表オフィシャルサイトほか [4] [6] を参考に作成

極小温度は約210 K である。

成層圏 ($\beta < 0$)

対流圏界面から高度約50 km までの領域を指し、大気温度は高さとともに上昇する。成層圏の大気温度はオゾンによる太陽紫外放射エネルギーの吸収と炭酸ガス、水蒸気及びオゾンの赤外放射によって熱の均衡が支配されている。成層圏の上限は高度約50 km にある約300 K の温度極大に対応する成層圏界面で定義される。

中間圏 ($\beta > 0$)

高度約 50–80 km の領域を中間圏とよぶ。対流圏と同じく高度が上昇すると共に大気温度が下降する。この領域の熱構造は基本的に、酸素分子による太陽紫外線放射の吸光加熱と炭酸ガスの赤外放射による冷却による釣り合いで定まるが、惑星運動、内部重力波、乱流熱伝導などの気象力学的な要素も考慮する必要がある。中間圏の上限は高度約80 km に存在する第 2 の温度極小に対応する中間圏界面で定義される。

熱圏 ($\beta < 0$)

高度 80–500 km には、地球大気の主要な電離領域である E, F 層を含む熱圏が広がっている。この領域では大気温度は高さとともに急激に上昇し、高度200 km においては 500–1200 K に達する。この高温は赤外冷却に有効である CO_2 , H_2O などの密度が著しく小さいことから実現される。熱圏の上部では大気が希薄になり、大気温度はある上限に収束するため、その付近のことを熱圏界面とよぶ。

電子密度による分類

高度約60 km 以上の大気は太陽紫外放射やX線放射により一部電離されるため、電離層とも呼ばれる。電離層は電子密度により分類され、60–90 km の領域をD層、90–130 km の領域をE層、これより上層のF層は、昼間には150–220 km をF1層、220–800 km をF2層と2つに分類されるが、夜間にはともにF層として分類される。

組成・力学的特徴による分類

熱圏は約100–120 km の間で (e.g., Offermann et al., 2007 [7])、気体粒子の平均自由行程がスケールハイト^{*1}を超えることにより、各粒子種 X はそれぞれの質量 $m(X)$ に応じたスケールハイト、(k はボルツマン定数、 g は地表面の重力加速度)

$$H(X) = \frac{kT}{m(X)g}$$

に対応した静水圧平衡分布に近い鉛直分布をする。この結果、軽い粒子は上空へ上がり、重い粒子は下方に滞留する拡散平衡あるいは重力分離と呼ばれる現象が起こる。

乱流圏、拡散圏

$z \leq 120$ km の大気では、流体運動により鉛直方向に空気の攪拌が頻繁に起こるため、重力分離は実質的に起こらない。よって、 $z \approx 120$ km を境界として、下層を乱流圏、上層を拡散圏と定義する。また、その境界を乱流圏界面と呼ぶ。

均質圏、非均質圏

乱流拡散は大気組成を均質化する作用があるが、太陽紫外放射の酸素分子解離作用が $z \approx 90$ km で卓越することから、大気的主要成分が均一になる高度は乱流圏界面よりも低く、 $z \approx 90$ km 程度である。これを境界として、下層を均質圏、上層を非均質圏と定義する。

1.1.2 太陽放射の影響

太陽はガンマ線から電波までの広範囲にわたるスペクトル域で電磁放射を行っている。地表付近で観測できる太陽電磁放射は、波長 3200–7800 Å の可視光、7800– 数10 μm の赤外線の一部、及び1 mm– 数100 m の電波、0.001 Å 以下のガンマ線である。一方、波長 0.01–3000 Å の X 線及び紫外線は大気に吸収される (図1.2)。本項では太陽放射と地球大気の相互作用について波長ごとに見ていく。

可視光と赤外線

太陽放射エネルギーの大部分は可視域で供給されるが、大部分は大気に吸収されず地表に到達する。言い換えれば、可視光は大気のエネルギー源としては非常に効率が悪いといえる。しかし相互作用が全くないわけではなく、大気粒子により空が青く見える原因であるレイリー散乱を起こす。

可視光に波長が近い一部の赤外線は地表まで到達する。大気で吸収された赤外線は大気温度を決め

^{*1} 大気の密度が高度とともにどれだけ減少するかを示す量

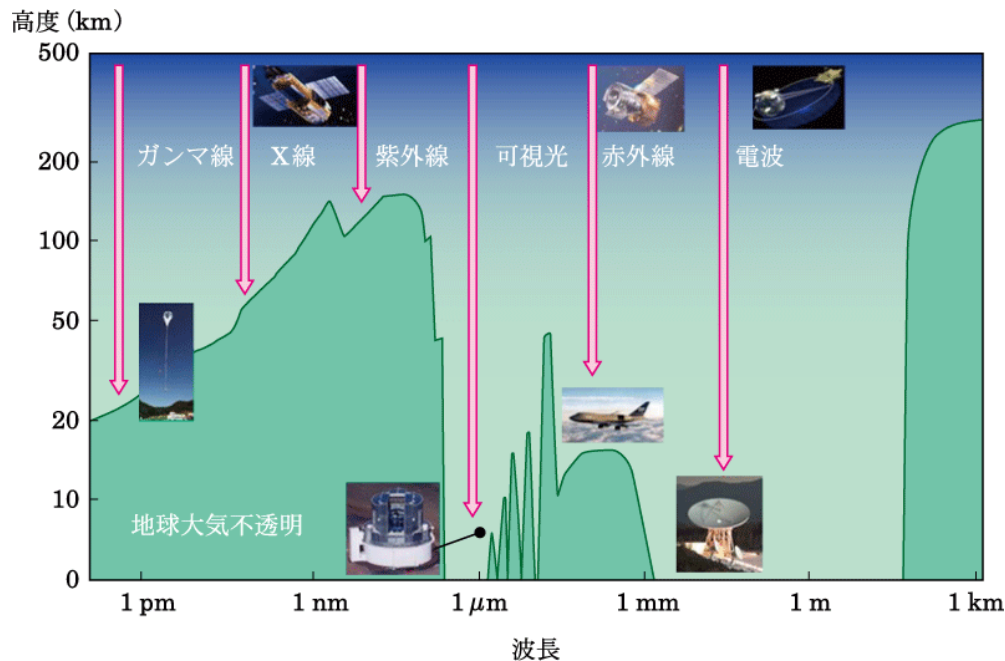


図1.2: 大気の間 [8]。緑の領域以下の高度には対応する波長の電磁波は届かない

る要因の一つである。大気中の H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CH_4 、 O_2 などの強い吸光効果を受け放射冷却を引き起こす。中間圏は放射冷却が強いと高度が上昇すると大気温度が下がるが、放射冷却が紫外線の加熱よりも弱い成層圏では高度と共に大気温度が上がる。

紫外線

紫外線はほとんどが大気に吸収されるため、大気構造に大きな影響を与える。紫外線は波長が 100 Å – 4000 Å と広範囲であるため影響を与える高度も広範囲である。波長 2000 Å – 3000 Å の中間紫外線 (MUV) は中間圏 ($50\text{--}80\text{ km}$) 及び成層圏 ($20\text{--}50\text{ km}$) に影響を与え、この領域の熱源としても重要な役割を果たす。波長 1300 Å – 1800 Å の Schumann-Runge 領域の紫外線は高度約 $80\text{--}120\text{ km}$ の O_2 を分解し酸素原子 O の生成源となっている。波長 $100\text{--}1300\text{ Å}$ の極紫外線 (EUV) は高度約 $100\text{--}200\text{ km}$ の範囲でほとんど吸収される。

X線

波長 $1\text{--}30\text{ Å}$ 、光子エネルギーにして 10 keV 以下のX線は、地球のD、E領域電離圏の生成に重要な役割を果たしている。太陽X線放射のスペクトル及び強度は太陽活動に強く依存しており、特に短波長側で顕著である。 $2\text{--}8\text{ Å}$ 帯では極大期には静状時の1000倍、 $8\text{--}200\text{ Å}$ 帯では100倍、 $44\text{--}60\text{ Å}$ 帯では10倍の増加観測される。

電波

電波が超高層大気に与える影響は少ないが、その強度の変動はX線と同様に太陽活動の状況をよく反映する。特に波長 10 cm 、周波数 3 GHz 程度のデジメートル波はEUV、X線放射束の変動と良い相関を

示し、超高層大気密度・温度変化ともよく対応する。EUV 放射はロケットまたは衛星を用いなければ観測できないが、デジメートル波は地上電波望遠鏡によって常時観測可能である利点がある。

1.1.3 太陽面現象と活動周期

太陽電磁放射の変動は、太陽面上で観察される様々な現象と密接な関係がある。本項ではその一部を見ていく。

黒点

黒点は太陽面現象としては最も顕著なものであり、大きいものでは肉眼でも観測できるので古くから知られていた。黒点が黒く燃えるのは、その場所が周囲に比べ相対的に低いため、平均 1500 K の温度差がある。黒点の寿命は 1 週間から数か月におよぶため、太陽自転とともに西から東へ、地球から見て約 27 日の周期で移動していく。よって西の周辺にあった黒点は約 2 週間で東の周辺から裏側へまわって視野から消えてしまうが、寿命が長ければ 2 週間後には西の周辺から再び出現する。

プロミネンス

プロミネンスはコロナ下部領域に見られる比較的温度の低い高密度ガス領域である。プロミネンスは磁力線に沿ってアーチ状に発達していくが、明るいガス塊がコロナ中を上昇するにしたがって、ガスは下向きに運動する。言い換えればプロミネンスは現象的に光球からコロナに向かって外向きに発達するが、それ自体を形成する物質はコロナガスが冷却・濃縮されて形成され、熱励起が盛んに起こっていると考えられる。

フレア

H $_{\alpha}$ などの彩層輝線が太陽面上の小領域で突発的に異常な明るさを持つことがある。この励起現象をフレアとよぶ。典型的なフレアは発生後数分で光度極大になり、その大きさは 10,000 km-30,000 km に達し、その後は数分から数時間で緩やかに消失する。フレア発生と同時に全てのスペクトル領域で莫大な電磁波放射が起こる。可視光、近紫外の放射変化は光球全体からの光束に比べ無視できる程度である。一方、EUV 領域では数 10 パーセント、X 線領域では普段の数倍から数 100 倍に増加する。加えて、フレア領域からは高エネルギーの電子・陽子が同時に放出され、地球近傍まで飛来する。

太陽フレアに伴う強い X 線放射により下部電離層が乱され、Dellinger 現象と呼ばれる短波通信の障害を起こす。さらにフレアからの高エネルギー粒子群はしばらく遅れて地球付近に到達し、極地域の電離圏に突入、磁気嵐・電波障害などを引き起こす。

太陽放射のほか、これらの太陽フレアや黒点相対数は平均 11 年の周期性を持つ。黒点相対数とは Johann Rudolf Wolf が考案した太陽活動の指標の一つであり、 g を黒点群の数、 f を観測された個別黒点の数、 k は観測者、観測方法による補正係数で観測結果を基準に一致させるためのもの。ウォルフの観測条件 (口径 8 cm、焦点距離 110 cm、倍率 64 倍の屈折望遠鏡による直視法) を $k = 1$ として、

$$S_n = k(10g + f)$$

で定義される。黒点数の年変化については 18 世紀初頭まで遡って推算されている。黒点数は極小期には 10 以下に低下するが、極大期には 200 を超える値となる。この太陽活動極大期と極小期では、熱圏の大気温度

が400 K 以上も異なる等、温度、密度、組成に影響を与えることが知られている。

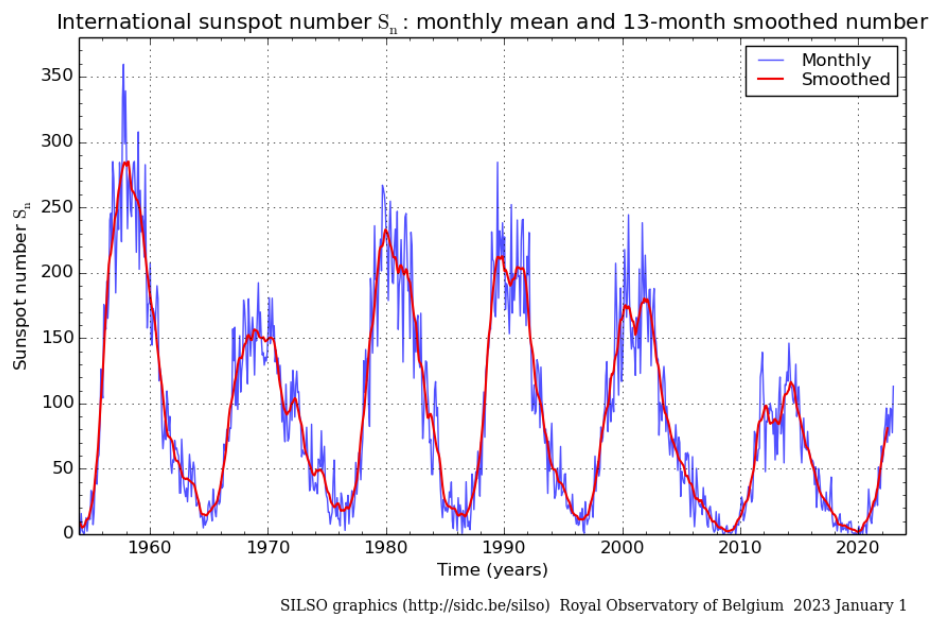


図1.3: 黒点相対数の長年変化 [5]

1.2 放射線と物質の相互作用

1.1.2 項でみたように X 線は地球大気に侵入し、大気と相互作用を起こす。電磁放射と原子及び分子との相互作用は吸光 (photo-absorption) と散乱 (photo-scattering) の 2 種に要約される。表 1.1 に大気中で起こる励起現象をまとめる。本項では本研究のターゲット帯域である X 線と物質の主な相互作用を見ていく。

表 1.1: 大気中での光学励起現象 ([6] より引用)

内部状態	作用する量子	励起過程	例	自然現象
変化なし	光子	Mie 散乱 Rayleigh 散乱 Thomson 散乱	エアロゾル・塵埃など 中性大気分子による 自由電子による	ヘーズ・夜行雲 青空・地球紫外アルベド 散乱法による電離層探査
	X 線, γ 線 高速電子 相対論的荷電粒子	Compton 散乱 制動放射 Cerenkov 光	自由・束縛電子による 極光電子 宇宙船	大気中での X 線散乱 極光 X 線 自然暗黒の下限
変化あり	共鳴線 非共鳴線	共鳴散乱・蛍光 Raman 散乱	主として許容線のみ 分子	地球コロナ レーザー・レーダー観測
	紫外線	同時解離・励起 同時電離・励起	$O_3 + h\nu = O^* + O_2^{**}$ $N_2 + h\nu = N_2^{+*} + e$	O_2 1.27 μm , O 6300 Å 昼間大気光 昼間大気光の一部
	主として非熱粒子 (例外: O 6300 Å 低緯度アーク)	粒子衝撃 荷電交換・捕獲 同時解離・励起 同時電離・励起	極光 1 次電子・2 次電子・光電子 $H^+ + M = M^+ + H^*$ $O_2 + e = O + O^* + e$ $N_2 + e = N_2^{+*} + 2e$	極光の主要発光機構 極光 H_α , L_α の一部 極光・光電子大気光などの一部
	主として非熱粒子	解離再結合 放射再結合 2 体反応 3 体再結合 電子状態 振動状態 回転状態	$O_2^+ + e = O^* + O^{**}$ $O^+ + e = O^*$ $H + O_3 = OH^* + O_2$ $O + O + O = O_2 + O^*$ $O^* + O_2 = O + O_2^*$ $N_2^+ + CO_2 = N_2 + CO_2^+$ -	F 領域大気光の一部 中間圏・熱圏下部の大気光 O_2 1.27 μm 大気光の一部 CO_2 4.8 μm 放射 赤外放射

1.2.1 光電吸収

光電吸収とは原子の束縛電子によって入射光子のエネルギーが吸収され、原子から電子が放出される現象。入射光子のエネルギーを $h\nu$ 、電子の束縛エネルギーを $B.E$ とすると、放出される電子のエネルギー E_e は

$$E_e = h\nu - B.E$$

で与えられる。光電子を放出し内殻の一部が空になると、励起状態を解消するため、空白を埋める形で上位軌道から電子が遷移する。この軌道のエネルギー準位差に基づき特性 X 線あるいはオージェ電子が発生する。

オージェ電子は原子の励起エネルギーが直接外殻電子に付与され、その電子が原子から放出されたもの。オージェ電子のエネルギーは放出された電子の殻の結合エネルギーである。

特性 X 線は高い電子準位から低い電子準位に遷移すると放射される X 線。地球大気で観測される特性 X 線はその組成比から、窒素と酸素の原子及び分子からの輝線である。

1.2.2 Compton 散乱

コンプトン散乱とは自由電子によって光子が弾性散乱される、あるいは光子のエネルギーが電子の結合エネルギーよりも十分大きく電子を自由電子と見なせるようになったときに、光子が電子により非弾性散乱を受けること。このとき散乱角 θ と散乱光子のエネルギー E_1 の関係は

$$E_1 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)}$$

で与えられる。ただし E_0 は入射光子のエネルギー、 m_e は電子の静止質量。また反跳電子のエネルギー E_e と反跳角 ϕ の関係は

$$E_e = E_0 - E_1 = E_0 \frac{(E_0/m_e c^2)(1 - \cos \theta)}{1 + (E_0/m_e c^2)(1 - \cos \theta)}$$

で与えられる。

電子 1 個当たりの散乱断面積は Klein・仁科の式により与えられる。また、光子エネルギーが低くなることでコンプトン散乱の散乱断面積がトムソン散乱の散乱断面積になる一方、光子エネルギーが高くなると散乱断面積は減少する。これは電磁波の振動数が高くなり、電子散乱における相対論的効果が無視できなくなるためである。

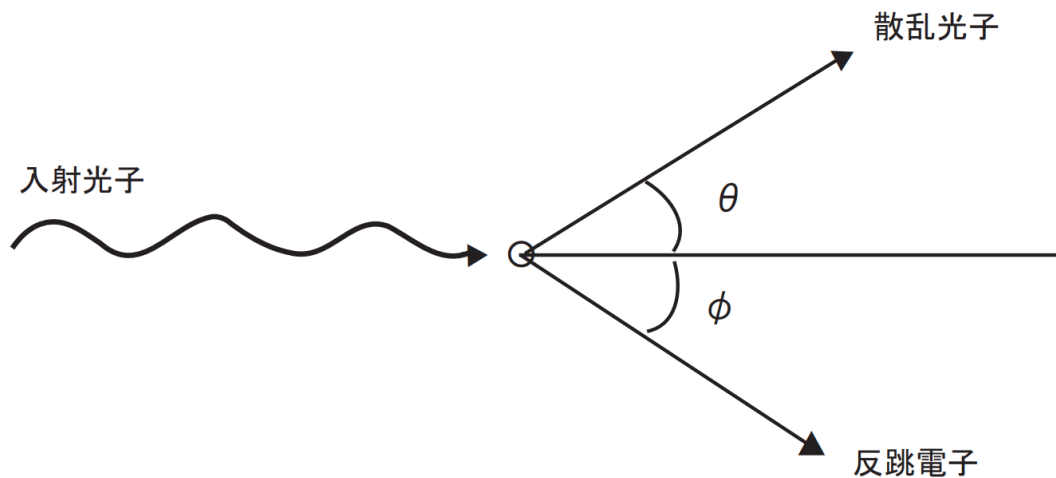


図1.4: コンプトン散乱 [9]

1.3 地球大気モデル

超高層大気の研究の為に知己の基本構造パラメータについてのモデルが重要である。1940 年代から様々な大気モデルの提案がされ続けてきた。現在では大気風モデル、中性大気モデル、電離大気モデルなどターゲットとする物理パラメータによって詳細なシミュレーションが可能となっている^{*2}。本節では本研究で扱うモデルについて簡単に述べる。

1.3.1 NRLMSIS

Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar Exosphere (NRLMSISE) [10] はアメリカ海軍調査研究所が開発した、地上から宇宙まで地球の大気を経験的に表した中性大気モデルである。主な使用用途として、大気抵抗による衛星軌道の減衰の予測がある。Fortran のほか Python で使用できる pypmsis [11] パッケージも配布されている。また CCMC の HP 上で使用することもできる。

表1.2に MSIS の入力パラメータと出力パラメータをまとめる。

1.3.2 SAMI2

Sami2 is Another Model of the Ionosphere(SAMI2) [12] は MSIS と同じくアメリカ海軍調査研究所が開発した、高度約100 km から数千 km の範囲で7つのイオン種 (H^+ 、 He^+ 、 N^+ 、 O^+ 、 N_2^+ 、 NO^+ 、 O_2^+) の動的プラズマと化学進化を2次元で扱う低緯度電離層モデルである。なお、これを3次元へと拡張したものが Sami3 is A Model of the Ionosphere(SAMI3) である。

入力	出力
年月日	He 数密度
時刻 (UTC)	O 数密度
測地高度 (0–1000 km)	O ₂ 数密度
測地緯度経度 (°)	N 数密度
現地時刻 (hour)	N ₂ 数密度
81 日平均の F10.7 太陽 Flux ¹	Ar 数密度
前日平均の F10.7 太陽 Flux	H 数密度
日磁気指数 (Ap 指数など)	全質量密度
	異常酸素数密度
	外気圏温度
	高度毎の温度
	NO 数密度

¹ 波長 10.7 cm の太陽電波 Flux

表1.2: MSIS の入力と出力パラメータ

入力	出力
年月日	7 種のイオン密度
時刻 (UTC)	7 種のイオン温度
3 か月平均の F10.7 太陽 Flux	7 種のイオン速度
前日平均の F10.7 太陽 Flux	電子温度
Ap 指数	NmF2 ¹
Kp 指数	hmF2 ²
	TEC ³
	電子密度
	ExB ドリフト

¹ F2 層の最大電子密度

² F2 層の最大電子密度が現れる高度

³ 全電子柱密度 (Total Electron Content)

表1.3: SAMI の入力と出力パラメータ

^{*2} Community Coordinated Modeling Center(CCMC) Model Catalog にまとめられている

1.4 熱圏の物理

熱圏・電離圏 (T-I) システムは、上方からも下方からも強制されている。上方からは、極端紫外線 (EUV) と X 線放射、太陽風と磁気圏との結合によるエネルギーと運動量の入力等がある。下方からは、下層大気起源の鉛直伝播波の広範なスペクトルが、エネルギーと運動量を T-I システムに与える (Oberheide et al., 2015 [13]; Liu, 2016 [2]; Sassi et al., 2019 [3])。イオン抗力、化学反応、ジュール加熱による電離層プラズマと熱圏中性粒子との結合は、T-I システムをさらに複雑にする。熱圏の状態を定義する主要な中性パラメータは、温度、組成、質量密度、風であり、これらは上記のエネルギーと運動量の入力により、時空間スケールの広い範囲で変動する (e.g., Qian and Solomon, 2012 [14]; Emmert, 2015a [15])。最終的に、中性または熱圏の変動は、電気力学的強制力の変動とともに電離圏の変動を駆動し、T-I システムの宇宙天気を作り出す (e.g., Rishbeth, 1998 [16]; Liu et al., 2021 [17])。

本節では Jones M Jr et al.(2022) [18] を参考に、主に高度約 100–200 km の組成、温度について解説し、熱圏の観測史について述べる。中性風のレビューは Dhadly M et al. (2023) [19] を参照されたい。

1.4.1 組成

熱圏は主に、 N_2 、 O_2 、 O 、 He 、 H で構成されている。図 1.5 は MSIS-2.1 と SAMI2(ver 0.98) による、中性化学種とイオン種の数密度の高度プロファイルである。約 200 km では電離大気全体でも中性種の 3–5 桁程度、数密度が低いことがわかる。なお、時刻は 2008/12/15 04:09:08(UTC)、緯度は 34.16°、経度は 118.13°、これはローカルタイムで 12 時に相当する。太陽・磁気静穏期を想定し、F10.7 は 0、 A_p 指数は 4 で固定している。

中性種は 1.1.1 項で述べたように、重力分離により各種スケールハイトに応じた分布をとる。200 km 以上では、熱圏はほぼ拡散平衡にあり、分子 (N_2 , O_2) リッチから原子リッチの大気に移行し、 O が上方に拡散し、約 200 km から 600 km の熱圏の主要種となる。約 250 km から 750 km の間では、 O が熱圏の質量の大部分を占め、したがって地球低軌道にある人工衛星やデブリが受ける大気抵抗の大部分を占める。

1.4.2 熱構造

100 km から 200 km の領域の複雑さを増しているのは、熱圏の温度分布が高度とともに急峻に上昇し、100 km で平均約 250 K、200 km で約 1000 K に達することである。図 1.6 は MSIS-2.1 と SAMI2(ver 0.98) による、中性大気温度と電子温度の高度プロファイルである。基本的なパラメータは図 1.3 と同じだが、中性大気は F10.7 パラメータの入力を変化させている。

熱圏の温度は、太陽紫外線の直接吸収、電離層との熱的相互作用、発熱性化学反応、 CO_2 や NO 等のいくつかの化学種による赤外線放射、動的運動による断熱的加熱・冷却など、複数の加熱・冷却過程が支配している。温度と質量密度 (組成) の関係は、静水圧平衡と理想気体の法則に依る。質量密度の変動は、下層の温度の変動に非常に敏感である。なぜなら、温度が上昇すると静水圧柱が膨張し、密度のスケールハイトが上昇し、一定高度での質量密度が上昇するからである。例えば、100 km 付近の高度 10 km の帯域で温度を 20 K 過大評価した場合、高度が高いほど大気密度を約 20% 過大評価することになる。従って、衛星で測定された上部熱圏の質量とプラズマ密度の変化を正しく解釈するためには、100–200 km の領域の温度と組成を理解する必要がある。

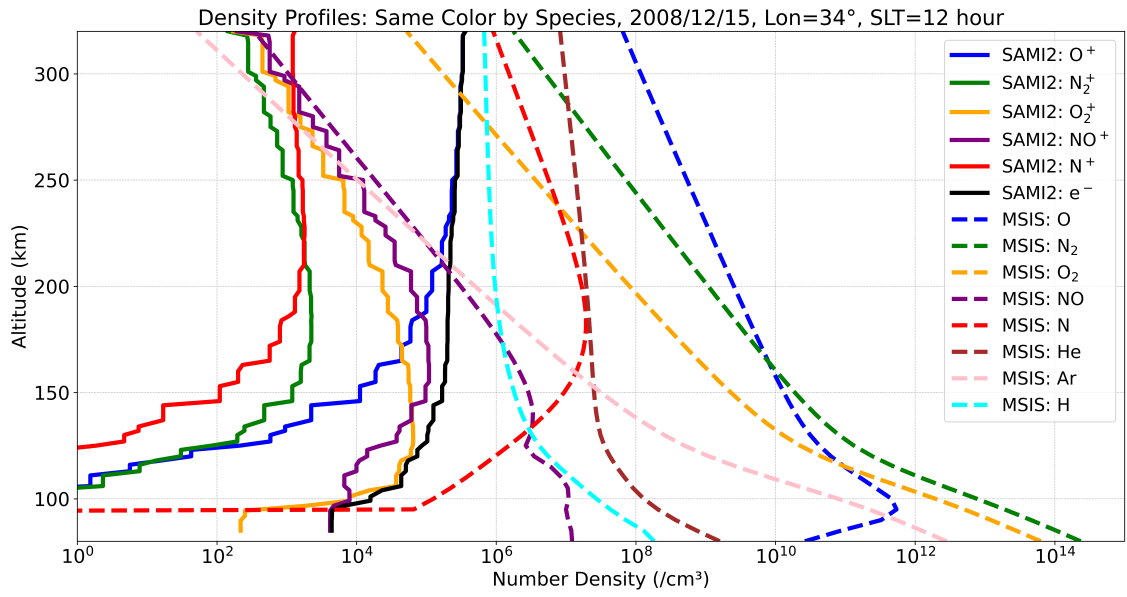


図1.5: MSIS・SAMI2 数密度の高度プロファイル

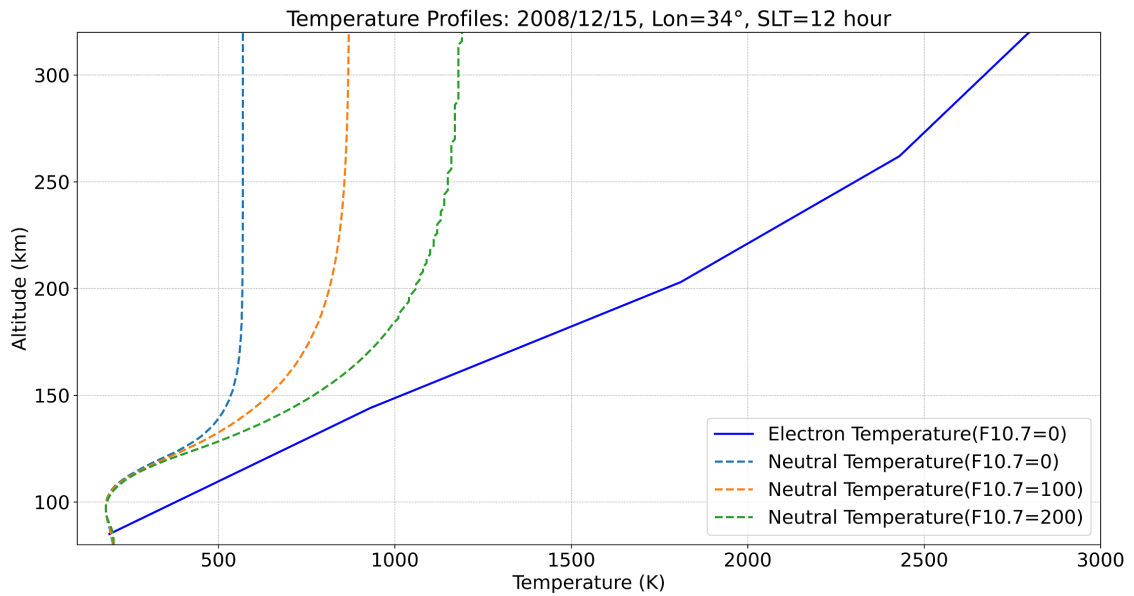


図1.6: MSIS・SAMI2 大気温度の高度プロファイル

1.4.3 熱圏の観測

全球大気モデルや中層・上層大気モデルは、大気予測システムや再解析データによる下層大気の強制を受けることで、熱圏・電離圏 (T-I) の組成や温度の特徴を一部再現することができる。2013 年の Decadal Survey^{*3}以降、データとモデルを組み合わせることで、高度 100–200 km の領域における組成や温度変動の理解が大きく進展してきた。

しかし、100–200 km の領域での温度と組成の測定はまだ非常にまばらであり、モデリング結果の検証や解釈の障害となっている。図1.7は、高度と年の関数として、過去から現在までの主要なデータセットの記録を示している。上空の主要な熱圏組成もしくは温度の現在進行中の研究測定を表1.4にまとめる。また、地上に設置された共鳴蛍光ライダーは、夜間に約80 km から約115 km までの大気温度を日常的に測定していて (Yuan et al., 2021 [20])、時折、140 km 以上に達する観測もある (Chu et al., 2011 [21]; Liu et al., 2016 [2])。

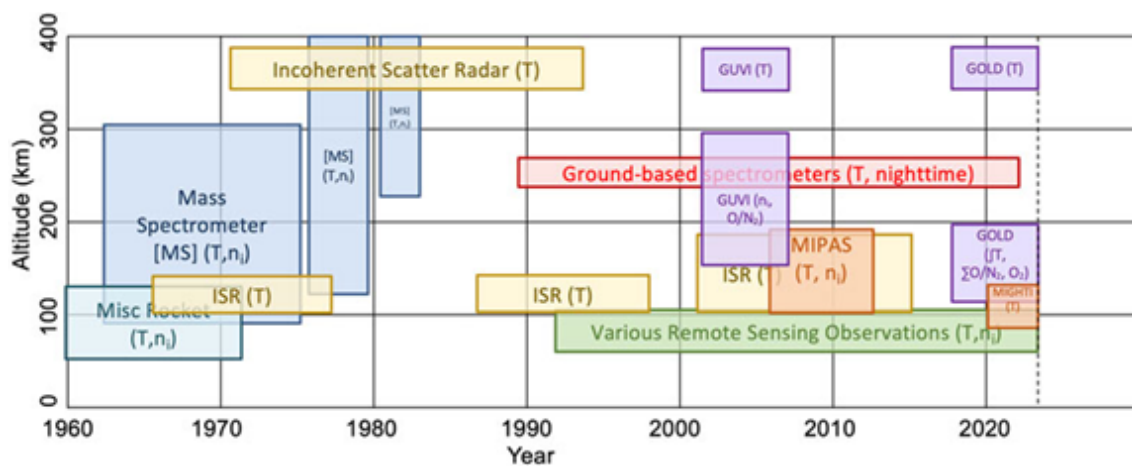


図1.7: 熱圏の組成・温度に関する観測機器 [18]

分解能の高い大気温度および組成の全球観測データが不足しているため、100–200 km の領域における熱圏の組成および温度現象の理解は、これまで主に MSIS シリーズ (Hedin et al., 1977a [25]; Hedin et al., 1977b [26]; Hedin, 1987 [27]; Hedin, 1991 [28]; Picone et al., 2002 [29]; Emmert et al., 2021 [10]) に依存してきた。この MSIS シリーズを、現在および将来の熱圏組成・温度測定によって改善する上で重要となるのは、測定技術そのものの、MSIS を初期値として使用したり、データ解析に必要な補助パラメータとして活用したりするという複雑な相互依存性を有している点である (e.g., Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS), Bermejo-Pantaleón et al., 2011 [30]; Global Ultraviolet Imager (GUVI), Meier et al., 2015 [31])。したがって、熱圏の温度と組成を測定・取得するための既存の技術を拡張し、新しい技術を開発する必要がある。特に、高度100 km から200 km の間は、強い鉛直勾配があり、熱圏・電離圏の高高度に強い影響を与える。100 km から200 km の間の下部と中部の熱圏の物理を制約するのに必要な観測は乏しく、Emmert et al. (2021) ではこの領域を「new ignorosphere(未知圏)」とも呼んでいる。さらに中性風の観点からもこの高度領域の観測が重要視されている。Oberheide et al. (2011) [32] は熱圏の 110–200 km の領域を「thermospheric gap(熱圏ギャップ)」と呼んでいる。

^{*3} 全米アカデミーが主導する今後 10 年間で達成すべき科学目標を定めるプロジェクト。

表1.4: 現在運用中の高度約 100–200 km 間の大気温度・組成を観測する機器

観測装置・ミッション名	観測物理量	制約
Ionospheric Connection Explore (ICON) ミッション ¹	中性温度	最大高度: 127 km (昼間)、108 km (夜間)
Global-scale Observations of the Limb and Disk(GOLD) ミッション ²	温度は垂直平均であり、その有用性は限定的; カラムO/N ₂ 及びO ₂ 鉛直分布	静止軌道上、縦方向の観測範囲は限定的
Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics(TIMED)	中性温度、カラムO/N ₂ 等 (図1.8参照 [24])	装置の故障により Limb 観測モードは 2007 年末まで
地上設置型インコヒーレント散乱レーダー (ISR)	温度	約 3 地点のみ、昼間のみ、キャンペーンベースの運用、特別な処理が必要
地上設置型大気光測定	温度	夜間、限られた地理的範囲、散発的な時間的範囲、高度約250 km

¹ Immel et al., 2017 [22]

² Eastes et al., 2017 [23]

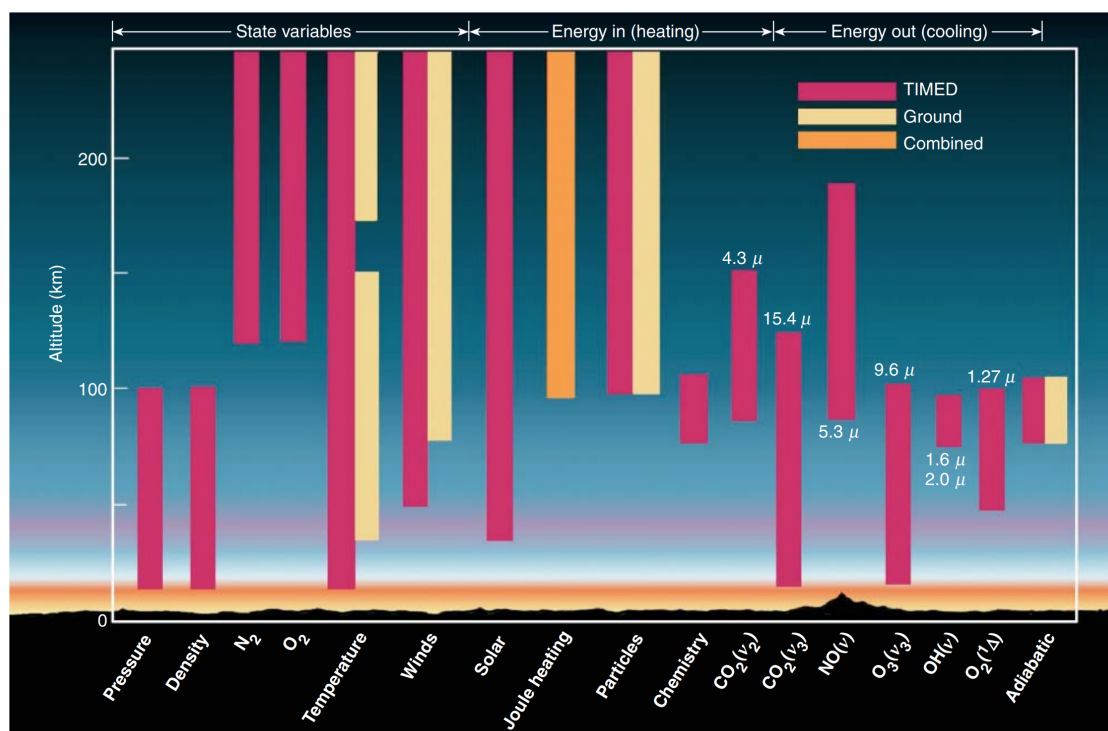


図1.8: TIMED 衛星と地上観測による高度の測定範囲 [24]

プ)」と定義した。この領域の力学についてはベクトル風の測定が不十分なため、ほとんどわかっていない。「未知圏」と「熱圏ギャップ」は重なっており、風測定の欠如は、「未知圏」における組成と温度の少なさと相まって、組成と温度の変動、及びその力学的制御が重要な役割を果たすことが知られている多くの T-I 現象に関する科学的進歩を著しく妨げている。

そこで Emmert et al. (2021) はこれらの科学的課題への対処方法として、以下を提言している。

1. 新しい「その場」観測; 質量分析計による熱圏の化学種密度の測定
2. 100–200 km 領域における高度分解温度と組成の新しいリモートセンシング (及びその場観測) 技術、広範囲の新たな測定
3. 既存および将来の組成・温度観測における系統的な偏りを特定し、特徴づけ、調整するための専門的な研究努力

このように超高層大気、特に高度 100–200 km の観測は強く待ち望まれていると言える。

1.5 本研究の目的

森田修論 (2018) [9] より X 線天文衛星「すざく」による X 線観測により、超高層大気の窒素と酸素の比を算出することが可能であることが明らかになった。本研究では「すざく」が約 10 年の間稼働したことに着目し、高度 100–200 km の領域における約 10 年の超高層大気の組成比の変動及び、11 年の周期性を持つ太陽活動との応答を調査する。

宇宙探査・ナビゲーション等の宇宙利用には、地球と宇宙の境界領域である「超高層大気」への理解が不可欠である。さらに、[1.4.3](#)項で述べたように高度 100–200 km の「未知圏」のダイナミクスの理解は Heliophysics の重要な課題の 1 つである。

第 2 章

X 線天文衛星「すざく」

2.1 概要

「すざく」(図2.1) は 2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた日本で 5 番目の X 線天文衛星である。2005 年 9 月から 2015 年 6 月まで、約 10 年間にわたり観測を行った。衛星の基本構造は直径 2.1 m の八角柱で、全長 6.5 m、重量は 1680 kg である。高度約 550 km を周回し、約 90 分で地球を 1 周し 1 日に 15 周回している。

「すざく」には 5 つの軟 X 線検出器と 1 つの硬 X 線検出器が搭載されている。軟 X 線検出器は 5 つの X 線反射鏡である XRT(X-ray telescope) と 4 つの X 線 CCD カメラである XIS(X-ray Imaging Spectrometer, 図2.2)、また、X 線マイクロカロリメータである XRS(X-ray Spectrometer) も搭載されているが、2005 年 8 月 8 日に XRS は故障し、以降の観測では使用できなくなった。

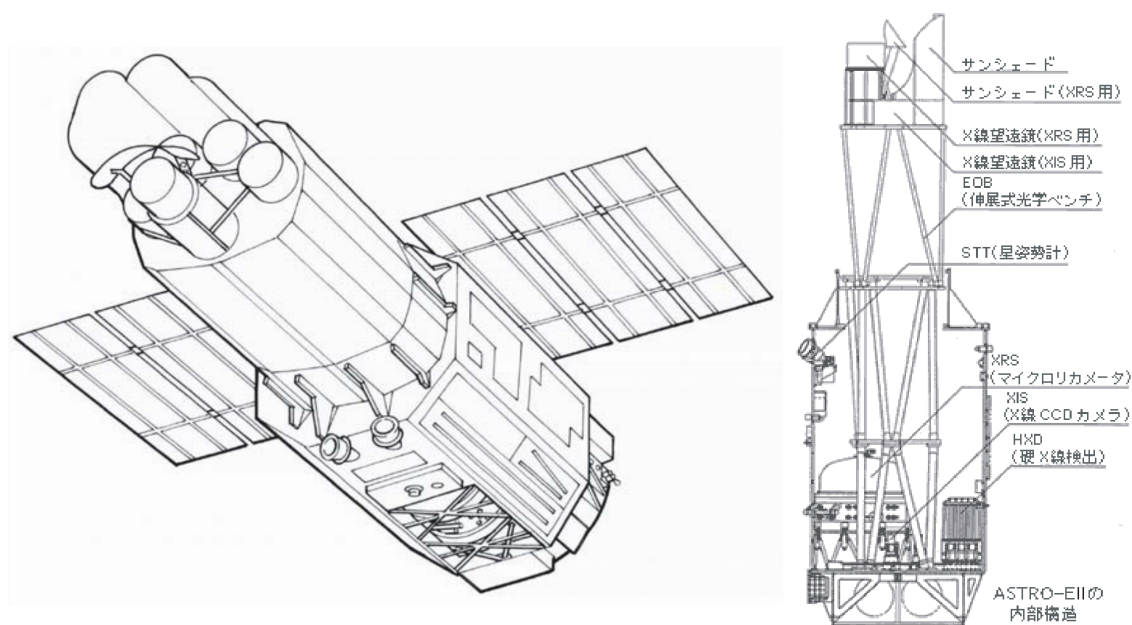


図2.1: 「すざく」の概観 [33]

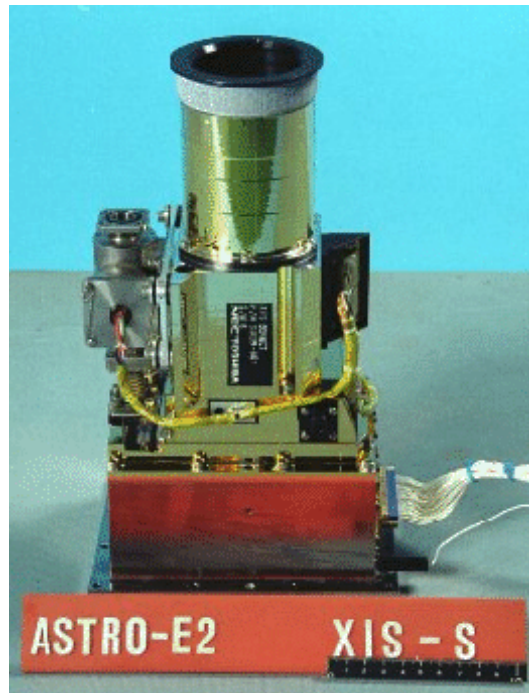


図2.2: XIS の概観 [34]

2.2 X 線 CCD カメラ XIS

2.2.1 X 線 CCD カメラの原理と構造

X 線検出に使用される CCD (Charge Coupled Device) は、半導体検出器を 2 次元アレイ状に配置したものである。その基本構造は、金属 (Metal) 電極、酸化膜 (Oxide) 絶縁層、半導体 (Semiconductor) の 3 層からなる MOS 構造で、シリコンが半導体材料として用いられている。金属層にはポリシリコンが採用され、半導体にはホウ素などの 3 価元素を添加した P 型半導体を使用しており、この構造では正孔が主な電荷担体 (多数キャリア) となる。

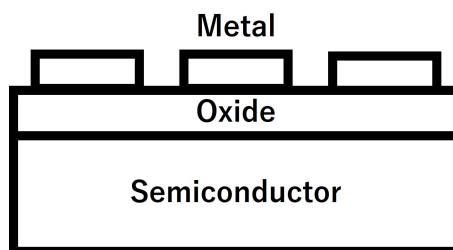


図2.3: MOS 構造

CCD では、金属電極に電圧を印加するとシリコン表面から正孔が移動し、キャリアが存在しない空乏層が形

成される。この空乏層内で X 線が入射すると光電吸収が起こり、生成された光電子はシリコン中で衝突を繰り返しながら電子・正孔対を形成する。この電子・正孔対の数は入射 X 線のエネルギー E に比例し、約 E/W_{Si} 個 ($W_{\text{Si}} \sim 3.65 \text{ eV}$) が生じる。空乏層内に集められた電子は、電場によって電極付近に移動し、ピクセル内で蓄積された電荷がバケツリレー方式（逐次電荷転送）によって読み出し口まで効率的に転送される。

「すざく」に搭載されている 4 つの X 線 CCD カメラ (XIS0、XIS1、XIS2、XIS3) は、それぞれ表面照射型 (Frontside Illuminated; FI-CCD) と裏面照射型 (Backside Illuminated; BI-CCD) に分かれる (図2.4)。FI-CCD (XIS0、XIS2、XIS3) は電極側から X 線を入射するためエネルギー分解能に優れるが、低エネルギー X 線では電極や絶縁層による吸収が課題となる。一方、BI-CCD (XIS1) は X 線を電極の逆側から入射することで低エネルギー X 線に対して高い検出効率を有するが、エネルギー分解能がやや劣る (図2.5)。

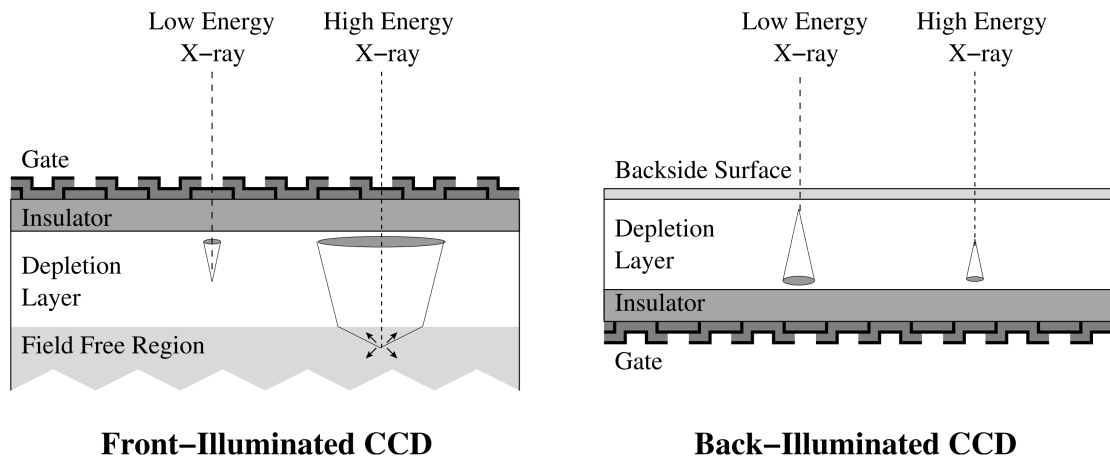


図2.4: CCD の構造図 [35]

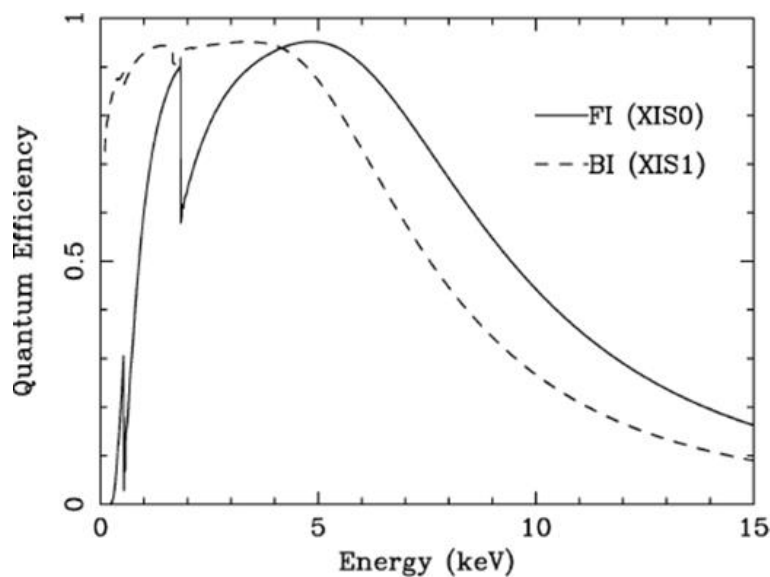


図2.5: FI-CCD と BI-CCD の検出効率のエネルギー依存性 [36]

XIS では 1 つのピクセルが 3 つの電極で構成される三相方式 (図2.6) を採用し、電圧を順次変化させることでポテンシャルの井戸を移動させ、効率的な電子雲の転送を実現している。また電荷転送方式として、撮像領域で蓄積された電荷を露出時間終了後にアルミニウムで遮光された蓄積領域へ移動させ、1 ピクセルずつ順次読み出す Frame Transfer 方式 (図2.7) を採用している。これにより、転送中に新たな X 線が入射して信号の位置情報が混乱することを防いでいる。

表2.1に「すざく」の XIS の基本性能についてまとめる。

表2.1: XIS の性能

視野	17'.8 × 17'.8
エネルギー帯域	0.2-12 keV
有効画素数	1024 × 1024
1 画素のサイズ	24 μm × 24 μm
エネルギー分解能	~ 130 eV @ 6 keV
有効面積 (XRT-I 込み)	340 cm ² (FI), 390 cm ² (BI) @ 1.5 keV 350 cm ² (FI), 100 cm ² (BI) @ 8 keV
時間分解能	8 s (Normal mode), 7.8 ms (P-Sum mode)

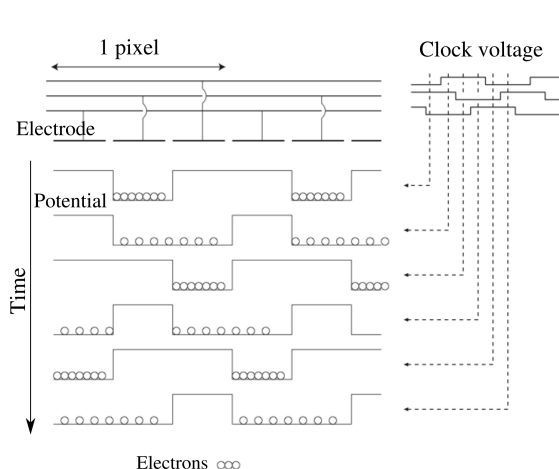


図2.6: 三相方式 CCD による電荷転送の概略図 [37]

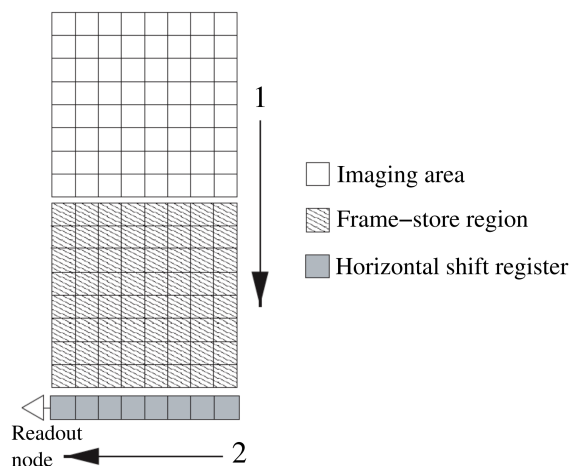


図2.7: Frame Transfer 方式の概略図 [37]

2.2.2 電荷注入機能 (Spaced-Row Charge Injection; SCI)

XIS には、CCD 撮像領域最上部のレジスタから CCD 内部に電荷を注入する「Charge Injection (CI)」機能が搭載されている。この機能では、図2.8に示すように、1024 pixel をカバーし、CCD の任意の位置に任意の量の電荷を注入できる。この機能の主な目的は以下の 2 点である。

1 つ目は、電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency: CTE) の正確な測定である。CCD は宇宙線損傷によっ

て構造内に格子欠陥が生じることで、転送される電荷がトラップされ、CTE が低下する。この現象はエネルギー分解能の低下を引き起こすため、CTE の定期的なモニタリングは、宇宙空間での CCD 性能維持において重要な役割を果たす。

2 つ目は、CTE の回復である。図2.9に示すように、あらかじめ格子欠陥が存在するカラムに犠牲電荷を注入しておくことで、その後に転送される X 線イベントの電荷がトラップされるのを防ぐことができる。これにより、劣化した CTE を部分的に回復させる効果が期待できる。

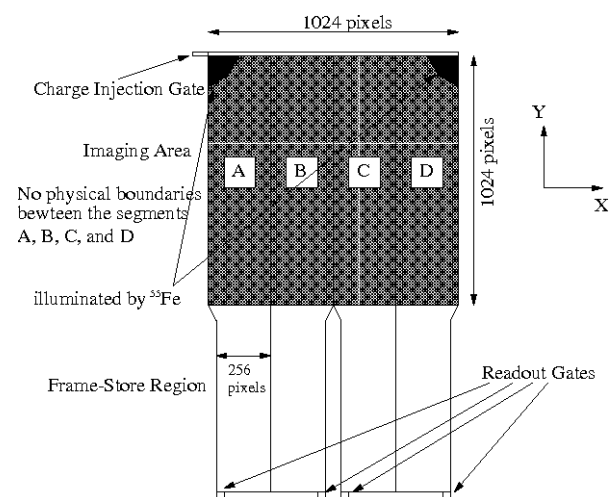


図2.8: XIS FI チップの概略図 [38]

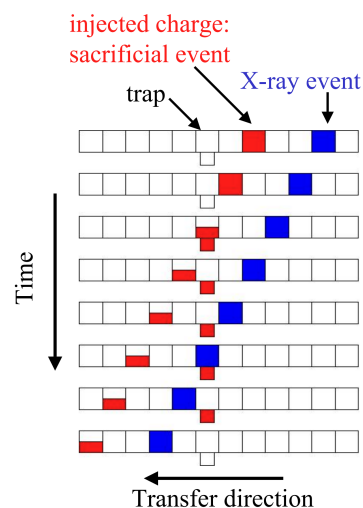


図2.9: SCI 機能の概略図 [39]

図2.10は、衛星打ち上げ後に校正用線源として使用される ^{55}Fe から得られたエネルギースペクトルのピーク値と幅を時系列で示したものである。ピーク値は打ち上げ後に徐々に減少し、幅は増加していることが確認される。しかし、打ち上げから約 500 日後の 2006 年 11 月に SCI を適用した結果、両者の値が明らかに回復していることが分かる。このことから、SCI は CTE 劣化の影響を軽減する効果が実証されている。

2.2.3 Event threshold, Split threshold

各フレーム内のピクセルごとの信号強度を集めたデータは「フレームイメージ」と呼ばれる。このフレームイメージ上では、X 線入射時の信号強度は通常のノイズ信号よりもはるかに大きくなるため、信号強度が特に高いピクセルは X 線イベントとして認識される。

X 線イベントを判断するためには、2 種類の閾値が設定される。

1 つ目は Event threshold で、この値を超えたピクセルは、ノイズではなく X 線入射による信号であるとみなされ、閾値を超えた波高値が X 線エネルギーに直接対応する。Event threshold のデフォルト値は表2.2に示されているように設定されているが、XIS の校正観測時には、FI-CCD においてデフォルト値100 ADU (Analog-to-Digital Unit) を最小50 ADU へと変更される^{*1}。

^{*1} 詳細はXIS config parameters (submode IDs)を参照

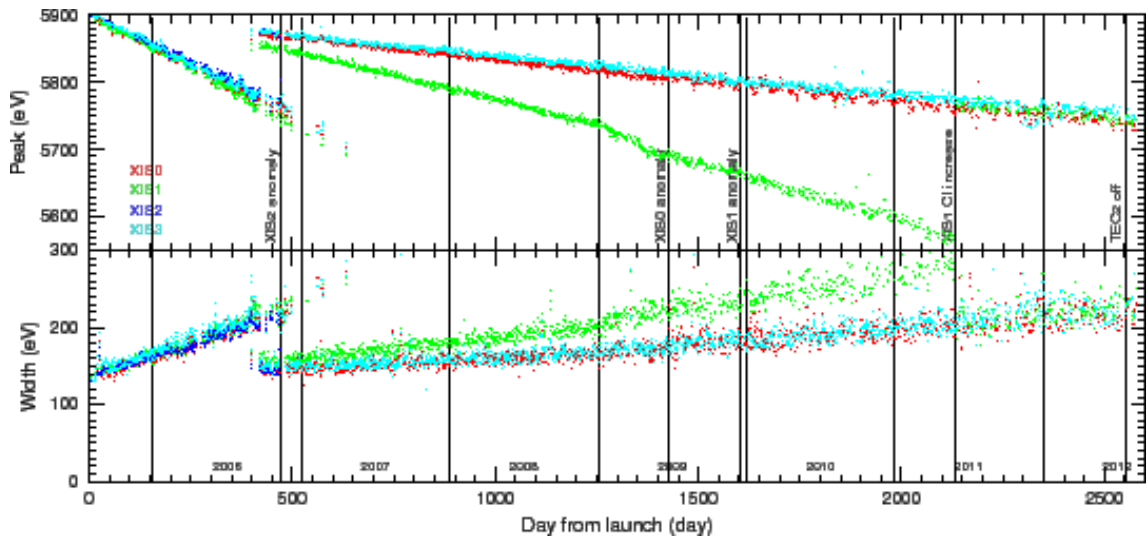


図2.10: 校正用線源である ^{55}Fe のラインのピークと幅. 赤:XIS0, 緑:XIS1, 青:XIS2, シアン:XIS3. [34]

表2.2: Event threshold [34]

Sensor	Event threshold	
	(ADU)	(keV)
FI	100	0.365
BI	20	0.073

2つ目は Split threshold である。この閾値は、X 線入射により発生した電子雲が複数のピクセルにまたがる場合に適用され、周囲のピクセルの信号強度がノイズか電子雲の広がりによって来るものかを判別する基準として機能する。この値は Event threshold よりも低く設定されている。

2.2.4 Grade 判定法

「すざく」XIS では X 線イベントとバックグラウンドイベントを判定するために、「あすか」衛星 SIS で用いられた Asca Grade 方式を改良した XIS Grade 方式を採用している。以下では、Asca Grade 方式と XIS Grade 方式の違いについて説明する。

Asca Grade 方式

まず「あすか」SIS で使用された Grade 判定法を説明する。まず、Event threshold を超え、周囲 3×3 ピクセルと比べて最も波高値の高いピクセルをイベント中心ピクセルと定義し、このイベント中心の周囲 3×3 ピクセル内におけるイベントの広がりから Grade を 0-7 に分類し、X 線イベントを選定する。これは電子雲は点対象に広がり、必ずピクセル周辺の辺を跨いで隣接するピクセルに入るためである。言い換えれば、ピクセルを 1 つ飛ばしたようなイベントは非 X 線イベントである。そのため図2.11のように Grade が定義される。Grade7 はこれらに分類されない全てのイベントである。Grade0, 2, 3, 4, 6 が X 線イベントとして採用され、それ以外

の Grade1, 5, 7 を非 X 線イベントとし通常の天体解析では除外される。

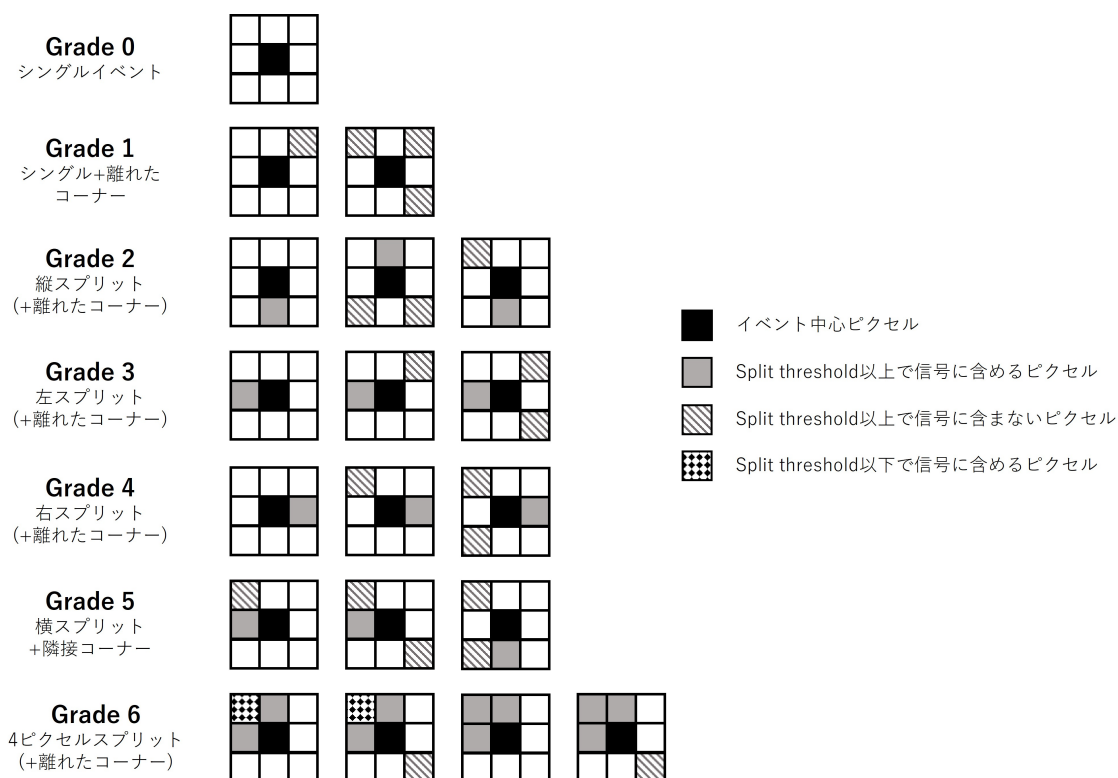


図2.11: Asca Grade

XIS Grade 方式

「すぎく」XIS では「あすか」SIS と異なり、各イベントに対して周囲 5×5 までのデータを保存できるようになった。この拡張により、X 線イベントの判定精度が向上し、Asca Grade 方式に以下の変更が加えられた:

- Asca Grade6 について、L 字型になっているイベントを **Grade6**、正方形型になっているイベントを **Grade8** と再定義
- Asca Grade7 について、外のピクセルのいずれも Split threshold を超えていない、すなわちイベントが 3×3 ピクセル以内で収まっているものを **Grade9** とする^{*2}
- 3×3 ピクセル内のスプリット閾値を超えたピクセルの外側に位置する、隣接するピクセル (5×5 の領域内) を調べ、これらのうち 1 つでもスプリット閾値を超えた場合、そのイベントを **Grade10** とする
- Grade8 の内、中心ピクセルに隣接する 2 つのピクセルよりも、角のピクセルの波高値が高かった場合、**Grade11** とする

通常、Grade0, 2, 3, 4, 6 が X 線イベントとして採用され、Grade1, 5, 7, 8, 9, 10, 11 を非 X 線イベントと判定する。なお Grade11 は Pile-up によるイベントとみなされる。

^{*2} X 線イベントとみなす場合もある。

2.3 昼地球観測

地球低軌道 (Low Earth Orbit, LEO) を周回する天文衛星は、軌道上で常に天体の方向を向いた固定姿勢で観測を行っているため、天体観測中に衛星が地球の影に隠れる時間 (地没) が存在する。一方で、衛星・天体・地球・太陽が図2.12のような位置関係になったとき、LEO 衛星は太陽 X 線に照射された地球大気を観測している。2.1節で述べたように「すざく」は約 10 年稼働を続けた。この期間、衛星が地球の影を周回する間、結果的に地球大気の観測も継続的に行っていたと言える。したがって、「すざく」が提供したデータは、約 10 年にわたる地球大気の長期モニタリング記録としても利用可能である。

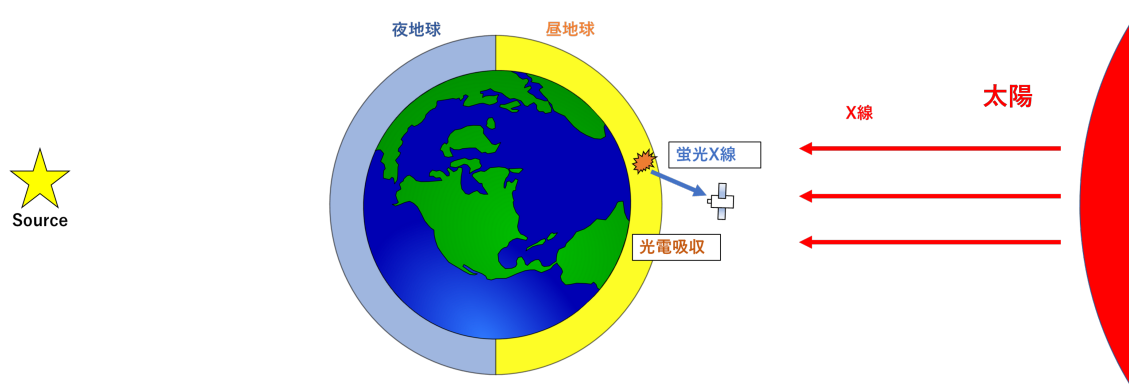


図2.12: LEO 天文衛星の昼地球観測

第 3 章

超高層大気の観測と解析

「すざく」の観測データは、天文学分野の標準形式である FITS (Flexible Image Transport System) 形式で保存されている。この FITS データは、ISAS/JAXA が提供するデータアーカイブ「[Data Archives and Transmission System \(DARTS\)](#)」にて配布されている。

配布される観測データには、以下の 2 種類が含まれる。1 つ目は、衛星から出力される全てのデータを含む「uncleaned event」である。このデータには、地球観測中のデータや南大西洋磁気異常帯 (SAA) など観測品質の悪い期間のデータ、さらには宇宙線由来のイベント (天体からの X 線以外の信号) も含まれる。2 つ目は、これらの質の悪いデータや不要なイベントを除去した「cleaned event」である。今回の解析では、2.3 節で述べたように、地球大気からの X 線放射を調べるため、「uncleaned event」を用いる。また、データ解析には、Heasoft-6.30.1 に含まれる FTOOLS、XSPEC12.12.1、および XSELECT2.5 を使用した。

付録 A では、解析対象となった 239 個の観測データを一覧にまとめている。なお、期待される窒素原子および酸素原子の輝線エネルギーはそれぞれ 392.4 eV と 524.9 eV であるため、低エネルギー帯の観測に優れた XIS1 を用いる。

3.1 データリダクション

今回の解析では「uncleaned event」を用いるため、昼間の地球大気を観測している時間のイベントを抽出するデータリダクションを行う必要がある。まず、FTOOLS 内の xispi を使用し、ゲイン^{*1}や CTI (Charge Transfer Inefficiency) の補正を含む最新のキャリブレーションを適用する。その後、イベントファイルに含まれる hot pixel や flickering pixel^{*2}を除去するため、FTOOLS の cleansis を使用する。この処理は、「uncleaned event」ファイルを用いる際に必須の手順である。

これらの処理を施すことで、DARTS で配布されている「uncleaned event」を用いた天体解析が可能となる。ただし、昼間の地球大気解析を行う場合には、さらに衛星の姿勢情報や空中座標を基に、望遠鏡が昼間の地球を向いている時間帯を選別する必要がある。この詳細については 3.2 節で述べる。また、本研究で用いるイベントデータは、ここで実施したリダクションに加え、3.4.3 項で述べる補正を施したものである。

^{*1} 入射 X 線エネルギーに対する出力チャンネル値。出力チャンネルは電荷量を電圧情報に変換した値であり、理想的には線形応答を示す。

^{*2} いずれも一定の閾値を超えたピクセルを指す。

3.2 データ解析

3.2.1 イベント抽出

データーダクションを行った後のイベントファイルから昼地球スペクトルを抽出するには、FTOOLS の `xselect` を使用する。このツールは、イベントファイルと同様に DARTS で配布されている `auxil` ファイル^{*3}を利用して、解析に必要なイベントを選択的に抽出することができる。本解析では、以下の条件に基づき、昼地球を観測している時間帯のイベントを抽出した。

Sun Altitude

Sun Altitude ($^{\circ}$) は、衛星から見た太陽が地球の地平線（または地球の縁）に対してどの位置にあるかを示す指標である。正の値 (`sun_alt > 0`) は、太陽が地平線の上にあり、衛星から見て太陽が地球を越えている、つまり「地球の昼側」に位置している状態を示す。一方、負の値 (`sun_alt < 0`) は、太陽が地平線の下に隠れ、衛星から見て太陽が「地球の夜側」に位置している状態を意味する。本研究では、 $60 < \text{sun_alt} < 100$ という条件でフィルタリングを行った。

Earth Elevation Angle (ELV)

ELV は、衛星の観測軸と地球の接線がなす角度を示す指標であり、 $\text{ELV} < 0$ の場合は、衛星が地球を向いていることを意味する。また、`DYE_ELV` は昼側の地球に対する仰角、`NTE_ELV` は夜側の地球に対する仰角を表す。本研究では、 $\text{ELV} < 0$ を条件とし、さらに Sun Altitude の条件と組み合わせることで、望遠鏡が地球を向いており、かつ地球が太陽に照らされている時間帯のイベントを抽出した。

Tangent Altitude

DARTS で配布される `auxil` ファイルには、衛星が観測している領域の地表からの高度 (`tangent altitude`) の情報は含まれていない (図3.1参照)。しかし、イベントファイル内の観測時刻情報を用いて計算により算出することが可能である。

本研究では、上記の ELV および Sun Altitude の条件に加え、Tangent Altitude が24 km の範囲内にあるイベントを12 km 刻みで区切り、次のように抽出を行った: 96–120 km, 108–132 km, 120–144 km、…、180–204 km。各 Observation sequence に対し、これらの8区間のイベントを抽出して解析を行った^{*4}。

3.2.2 バックグラウンド

X 線観測におけるバックグラウンドは、大きく非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background; NXB) と X 線バックグラウンドの2種類に分類される。NXB は、主に荷電粒子が検出器や衛星構造材と反応して生じる X 線である。一方、X 線バックグラウンドは、荷電粒子や中性子に起因する大気由来の X 線放射が含まれる。通常、これらのバックグラウンド成分を取り除くためには、太陽照射がない夜地球のデータを使用し、同高度帯でのバックグラウンドを推定・差し引くことが望ましい。しかし、本研究では図3.2に示すように、ター

^{*3} 天体観測中の衛星の姿勢情報や座標情報を含む補助ファイル

^{*4} 実際には視線方向に積分されており、その高度における正確なデータではないことに注意。

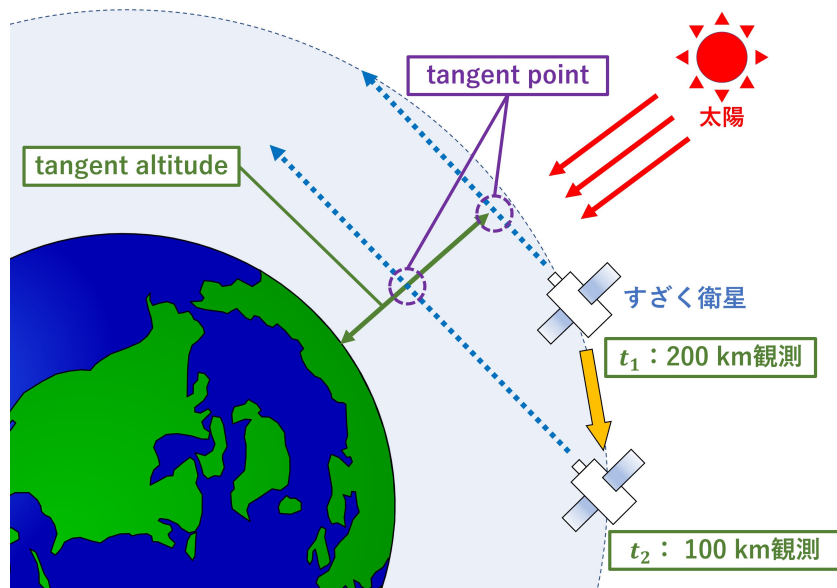


図3.1: 高度ごとにイベントを抽出

ゲットである酸素および窒素の輝線が非常に明瞭に検出されている。したがって、バックグラウンドの寄与は無視できる程度に小さいと判断し、解析を進める。

3.2.3 レスポンスファイルの作成

X線 CCD カメラは入射光子を内部で電荷に変換し、その電荷によって発生する電気信号の電圧波高値をデジタル値に変換している。したがって、入射光子のエネルギーと検出されたチャンネル波高値を対応させるレスポンスファイルを作成する必要がある。RMF(Redistribution Matrix File) はあるエネルギー E の光子が入射したときの波高値の分布を行列として保存したものであり、ARF(Auxiliary Response File) は望遠鏡を含む検出器の有効面積をモンテカルロ計算で求めたものである。RMF は xismfgen、ARF は xissimarfgen で作成できる^{*5}。

表3.1に昼地球解析に用いる ARF ファイルを作成したときの入力パラメータを示す^{*6}。

^{*5} 2つのレスポンスファイルは高度によつての差異がほぼ無い為、フィッティングには 96 – 120 km のスペクトルを用いて作成されたファイルを使用

^{*6} 詳細は[Fhelp](#)を参照

表3.1: 昼地球 ARF 作成入力パラメータ

パラメータ	入力	補足
instrume	XIS1	
pointing	AUTO	
source_mode	UNIFORM	
source_rmin	0	
source_rmax	20	ソースイメージを円として半径 20arcmin
num_region	1	ARF を生成する領域の数の指定
region_mode	DETCIRC	検出器座標を使用
region_x1	512	円形領域の中心の x 座標
region_y1	512	円形領域の中心の y 座標
region_rmin1	0	領域の内半径
region_rmax1	600	領域の外半径。上と合わせ XIS の中心ピクセルから半径 600 を領域とする
limit_mode	MIXED	
num_photon	100000	各エネルギービンの光子数が 100000
accuracy	0.005	各エネルギービンの計算精度が 0.005
phafile	<96to120 km のスペクトルファイル>	
detmask	<calmask_path>	ae_xil_calmask_20060731.fits を使用
attitude	<auxil/aeNNNNNNNNN.att>	
rmffile	<RMF ファイル名>	
estepfile	medium	計算ステップ幅の指定
arffile1	<ARF ファイル名>	
gtifile	none	
date_obs	<OBS sequence の観測開始日>	

3.2.4 スペクトル解析

図3.2に上記のデータ処理を施して得られた昼地球大気の 0.32–0.61 keV のエネルギースペクトルの 1 つを示す。これは OBS ID 100019030(観測開始日: 2005/9/10) の 96–120 km^{*7}間のスペクトルを抽出したものである。窒素原子及び酸素原子の輝線中心は392.4 eV と524.9 eV であるので、窒素及び酸素由来の輝線であることが分かる。

図3.3は図3.2に対し、蛍光 X 線成分として 2 つのガウシアン関数、現象論的に連続成分として 1 つのべき関数を加えたモデルでフィッティングを行った結果である。

$$A(E) = \frac{F}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E - E_l)^2}{2\sigma^2}\right)$$

^{*7} 以後、中間点の「108 km のデータ」とよぶ。その他の高度領域についても同様。

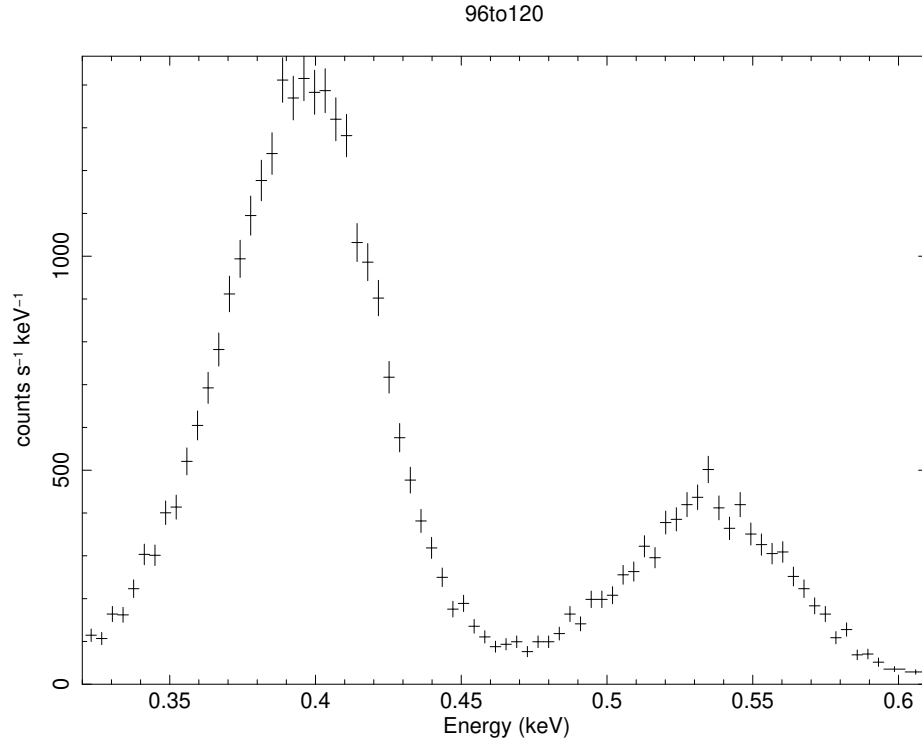


図3.2: OBS ID:100019030 108km の窒素・酸素輝線スペクトル

$E_l \cdots$ Line energy [keV]

$\sigma \cdots$ Line width [keV]

$K \cdots$ total photons [$/\text{cm}^2/\text{s}$]

$$A(E) = K E^{-\alpha}$$

$K \cdots$ total photons [$/\text{keV}/\text{cm}^2/\text{s}$ at 1 keV]

$\alpha \cdots$ photon index of power law

このときの χ^2 検定によるベストフィットパラメータを表3.2に示す。このとき、 $\chi^2/d.o.f = 89.79/77 \simeq 1.17$ と良くフィットできていることがわかる。なお、幅 σ についてはフリーパラメータにするとフィットが収束しないデータが多数存在するため、 $\sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{keV}$ 程度の範囲に制限した。

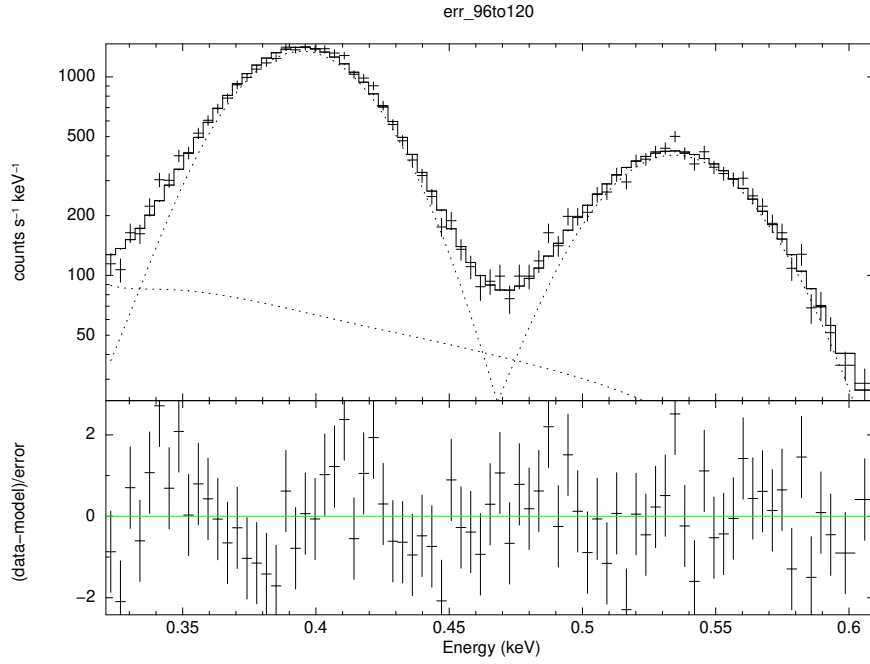


図3.3: OBS ID:100019030 108km の窒素・酸素輝線スペクトル fitting 後

表3.2: OBS ID:100019030 108km の窒素・酸素ベストフィットパラメータ

パラメータ	窒素	酸素
E_l [keV]	$0.3933^{+0.0005}_{-0.0005}$	$0.5377^{+0.0008}_{-0.0008}$
σ [keV]	0.0148(frozen)	0.0149(frozen)
F	$8.179^{+0.131}_{-0.132}$	$1.409^{+0.040}_{-0.040}$
$\chi^2/d.o.f$	1.1661(89.79/77)	

窒素輝線強度 (N-K Flux; F_N) と酸素輝線強度 (F_O) の比を「酸素/窒素 Flux 比; F_O/F_N ^{*8}」と呼称する。すなわち、図3.3の酸素/窒素 Flux 比は以下のように計算される。

$$\frac{F_{\text{Oxygen}}}{F_{\text{Nitrogen}}} = \frac{1.409^{+0.040}_{-0.040}}{8.179^{+0.131}_{-0.132}} \simeq 0.1723^{+0.0056}_{-0.0056}$$

他の高度についても同様の解析を行い、酸素と窒素それぞれの Flux および、酸素/窒素 Flux 比の高度依存性を調べた。また、表A.1に示す計 239 個の観測データ（約 10 年分）についても同様の解析を実施し、地球大気の長期変動について調査した。

*8 このとき、2つの輝線はそれぞれの原子、分子、イオンからの放射が重なった状態であると考えられる

3.3 解析結果

3.3.1 窒素・酸素輝線強度

図3.4に OBS ID:100019030(2005/9/10-) の窒素および酸素 Flux を高度を横軸としてプロットした結果を示す。窒素は100 km 付近、酸素は170 km 付近で Flux が最大となることが確認できる。この結果は、図3.5に示すような大気の発光構造を反映していると解釈できる。青い円で示されるのが大気的主要な発光層であり、衛星は赤い矢印のようにこの層の縁（Limb）を観測している。観測される Flux は、3.2.1項で説明したように視線方向に沿った積分値である。この積分値は、観測高度が大気発光層の内円に接する位置で最大となるため、グラフのような形状になると考えられる。酸素のピーク高度が高高度側にシフトしているのは、O-K 放射が CCD に届くまでに窒素により2次吸収されるためと考えられる。観測 Flux が視線方向に沿った積分値であることに加え、この2次吸収のため、酸素/窒素 Flux 比を厳密な大気の酸素/窒素数密度比と対応させることは困難である。

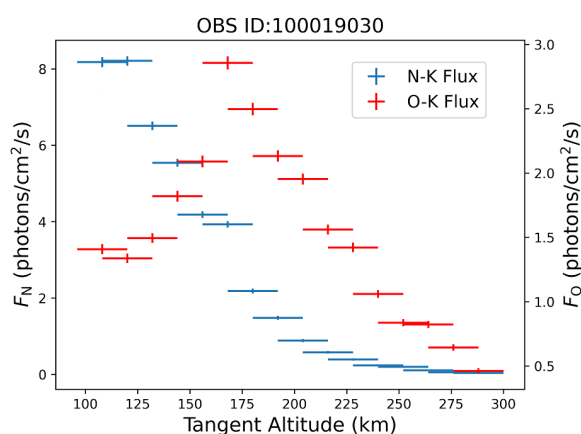


図3.4: OBS ID:100019030 窒素・酸素 Flux の高度依存性

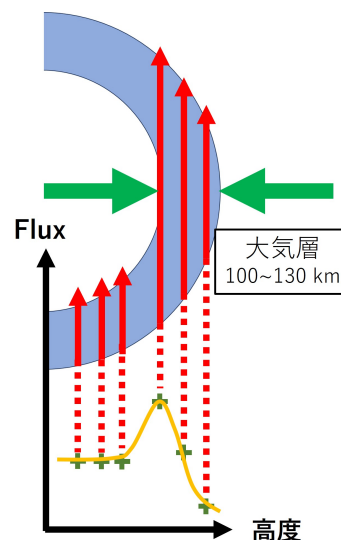


図3.5: 窒素輝線の大气 Limb 観測

また、以下に高度108 km から192 km における窒素 Flux の長期変動、酸素 Flux の長期変動を示す。全ての Flux で、2008 年から2009 年にかけて最小値を示し、2012 年以降に最大値をとるような特徴的な変動を示していることがわかる。

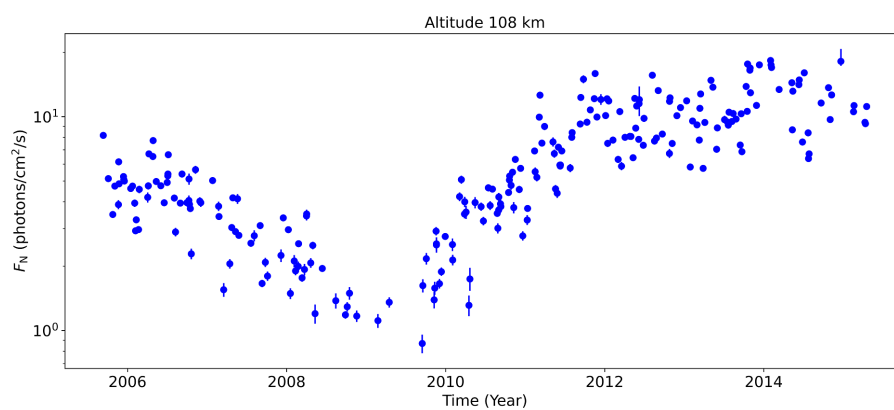


図3.6: 窒素 Flux の長期変動: 高度108 km

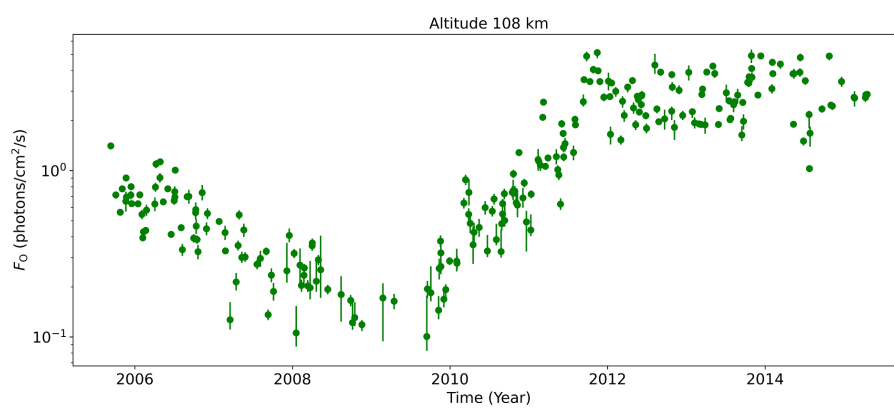


図3.7: 酸素 Flux の長期変動: 高度108 km

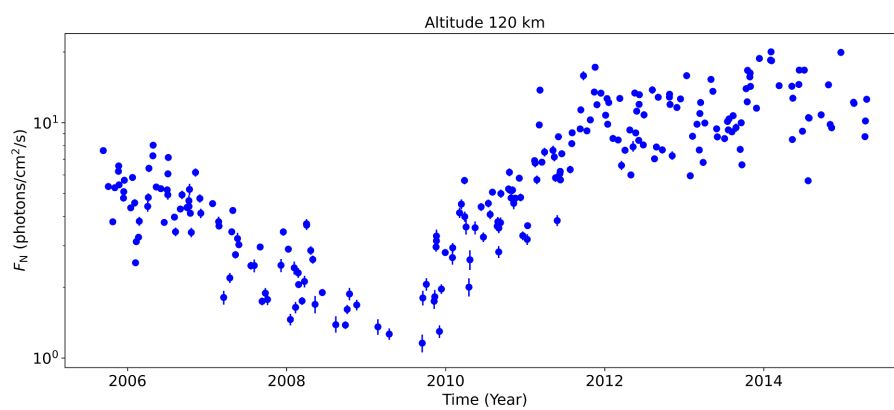


図3.8: 窒素 Flux の長期変動: 高度120 km

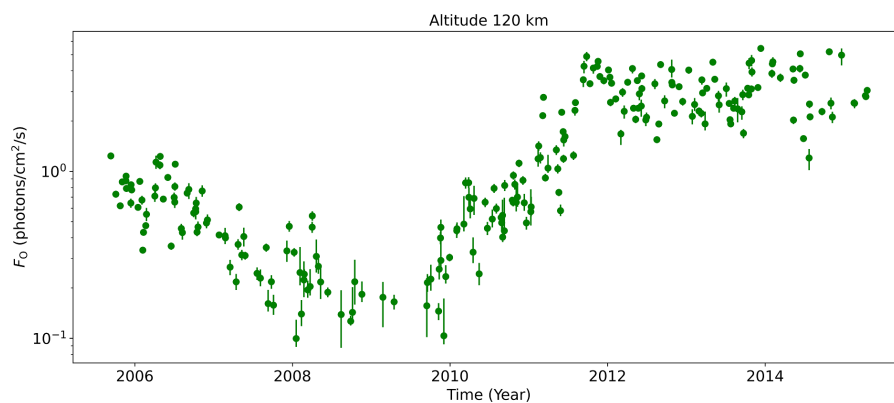


図3.9: 酸素 Flux の長期変動: 高度120 km

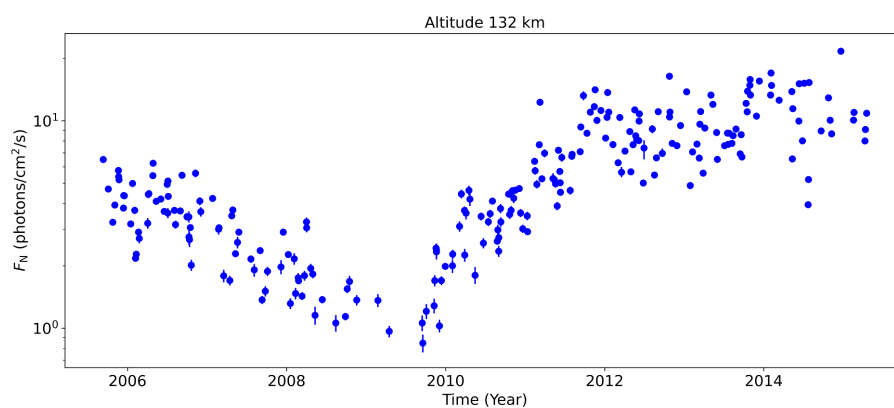


図3.10: 窒素 Flux の長期変動: 高度132 km

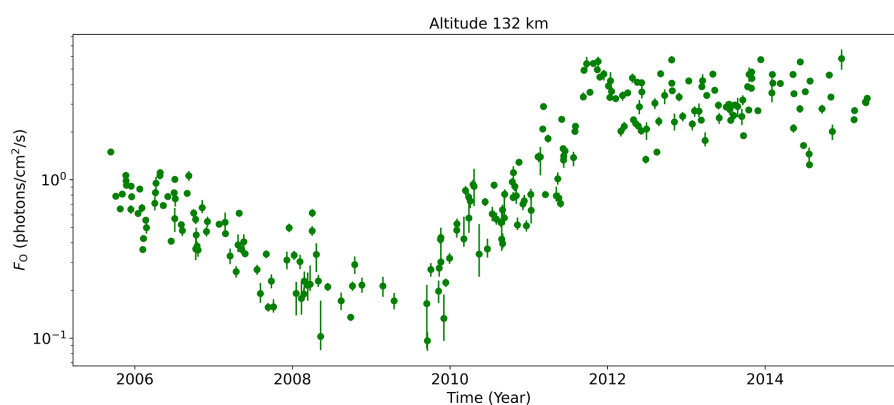


図3.11: 酸素 Flux の長期変動: 高度132 km

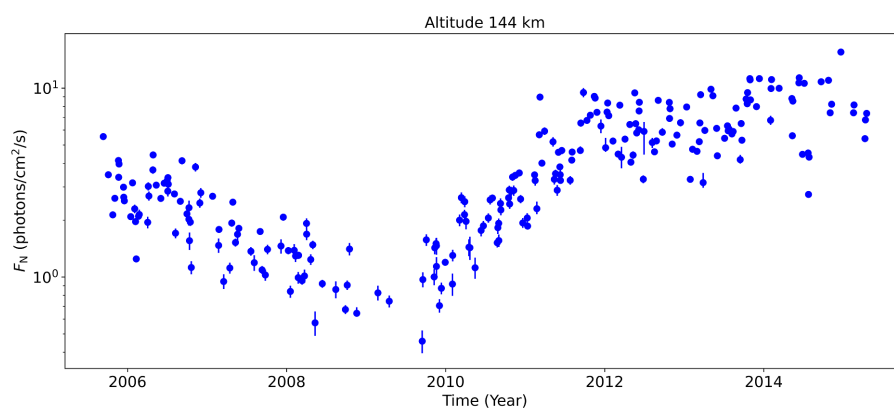


図3.12: 窒素 Flux の長期変動: 高度144 km

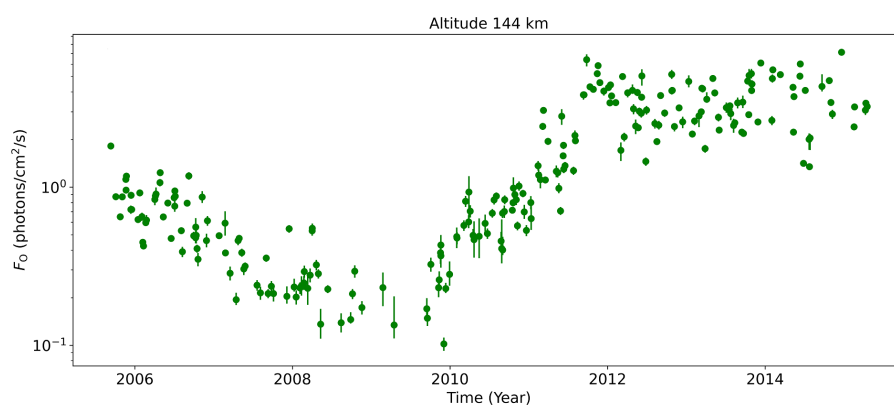


図3.13: 酸素 Flux の長期変動: 高度144 km

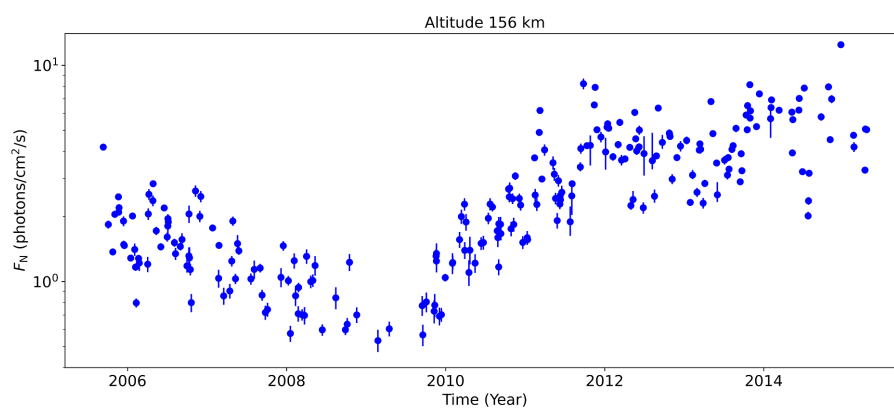


図3.14: 窒素 Flux の長期変動: 高度156 km

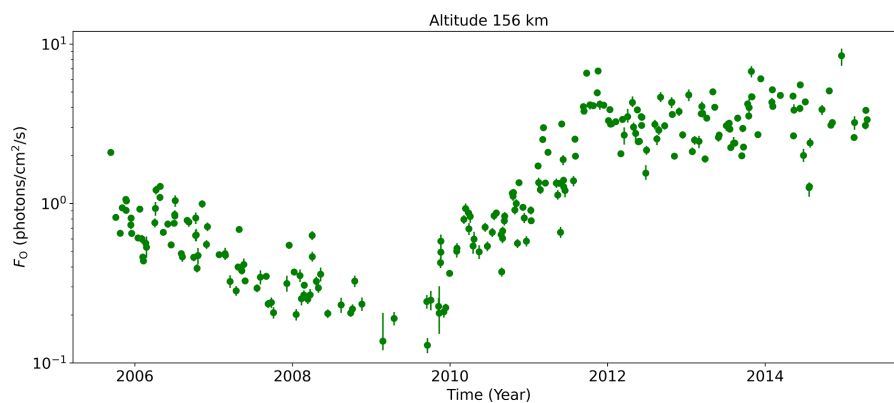


図3.15: 酸素 Flux の長期変動: 高度156 km

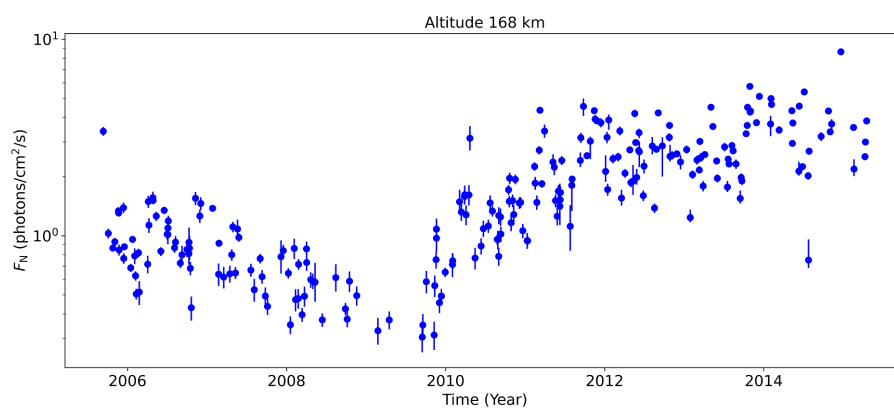


図3.16: 窒素 Flux の長期変動: 高度168 km

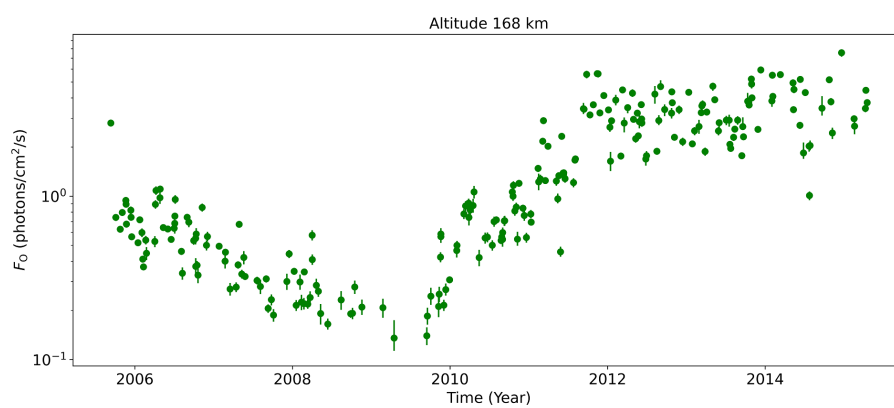


図3.17: 酸素 Flux の長期変動: 高度168 km

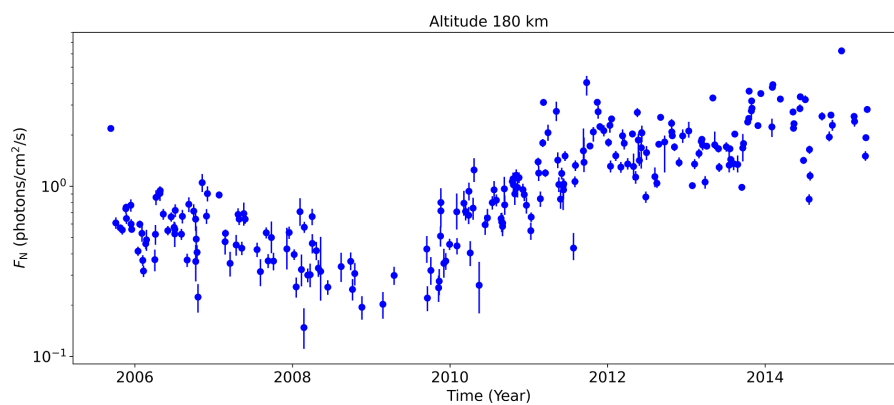


図3.18: 窒素 Flux の長期変動: 高度180 km

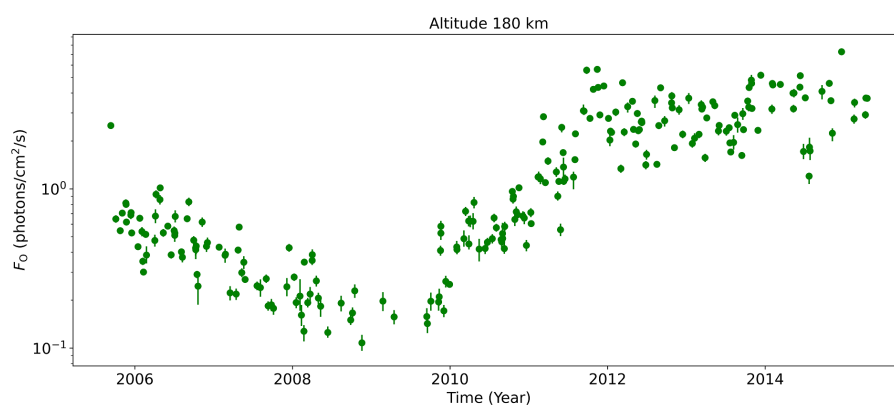


図3.19: 酸素 Flux の長期変動: 高度180 km

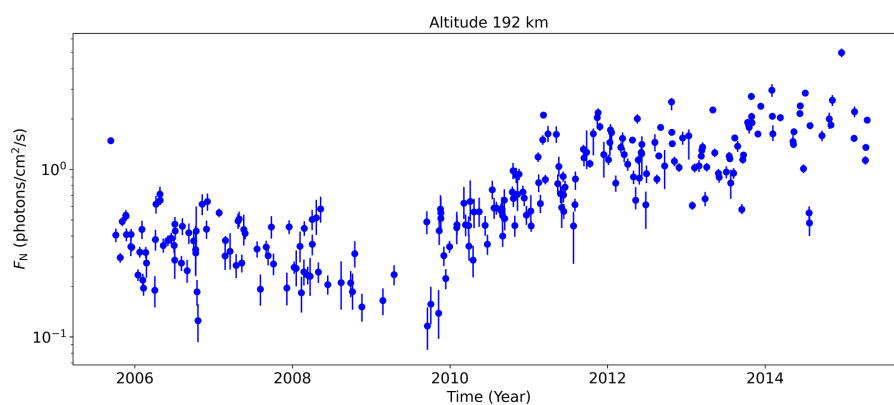


図3.20: 窒素 Flux の長期変動: 高度192 km

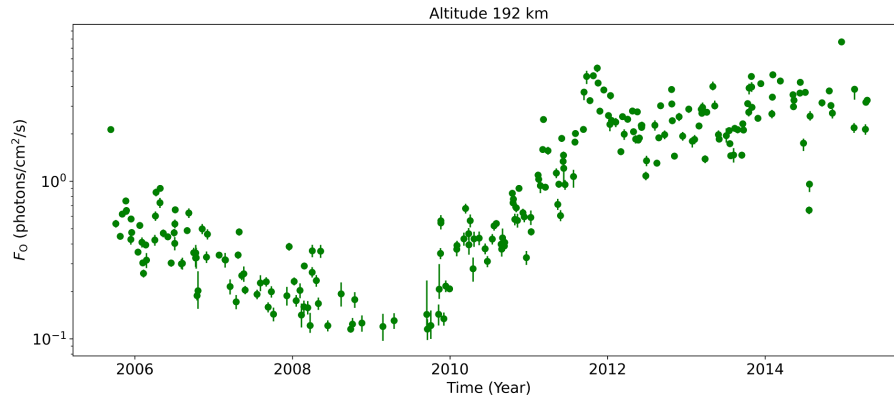


図3.21: 酸素 Flux の長期変動: 高度192 km

3.3.2 酸素/窒素の Flux 比

図3.22に OBS ID:100019030(2005/9/10≈) の酸素/窒素 Flux 比を高度を横軸としてプロットしたものを示す。縦軸は対数スケールであるので、120 km 前後から高度が高くなるにつれ、酸素/窒素 Flux 比が指数関数的に増加することがわかる。

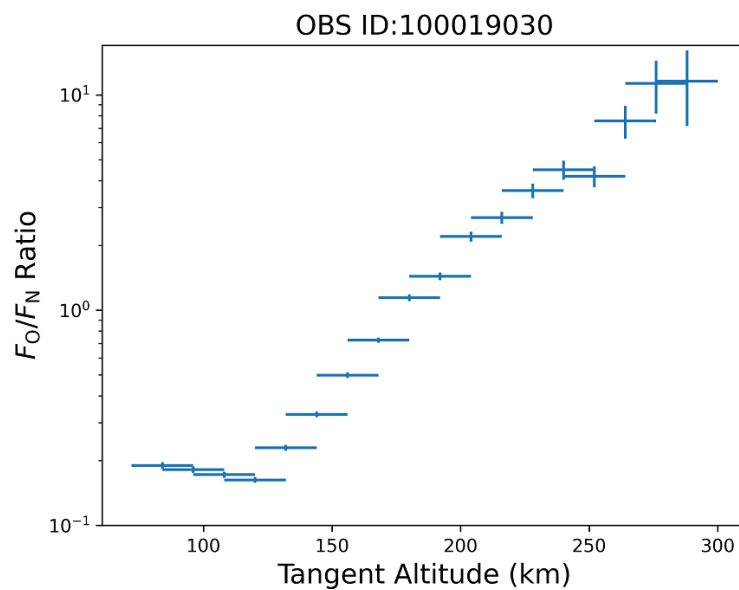


図3.22: OBS ID:100019030 酸素/窒素 Flux 比の高度依存性

また、以下に高度108 km から192 km における酸素/窒素 Flux 比の長期変動を示す。窒素 Flux、酸素 Flux だけでなく、酸素/窒素 Flux 比も 2008 年から 2009 年にかけて最小値を示し、2012 年以降に最大値をとるような特徴的な変動を示していることがわかる。これらの長期変動についての議論は4章にて行う。

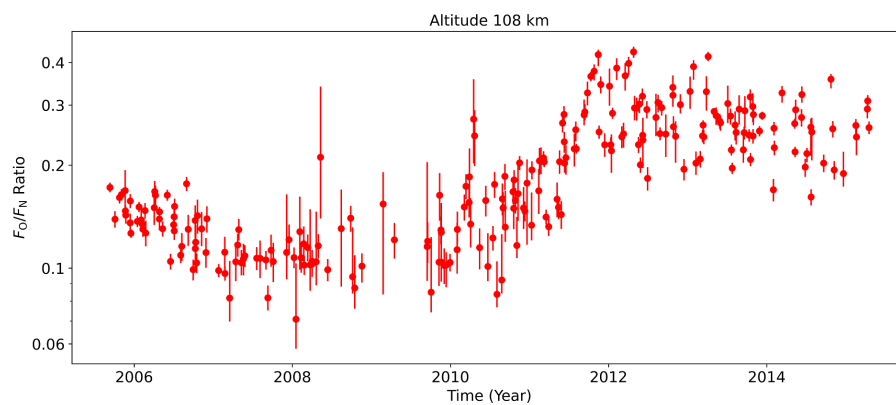


図3.23: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度108 km

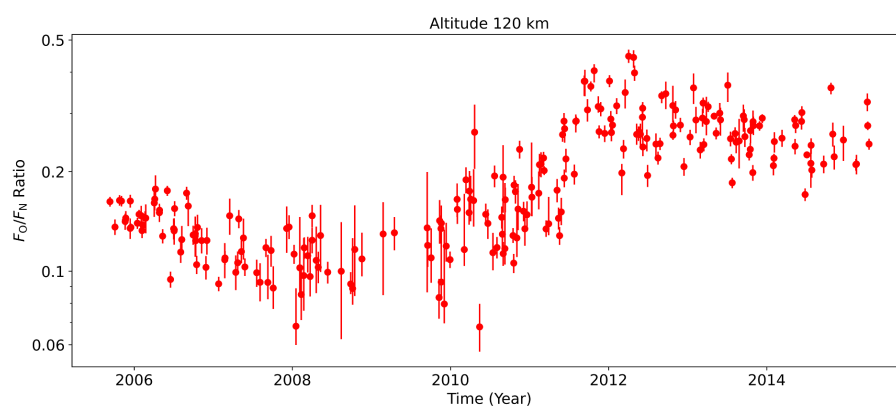


図3.24: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度120 km

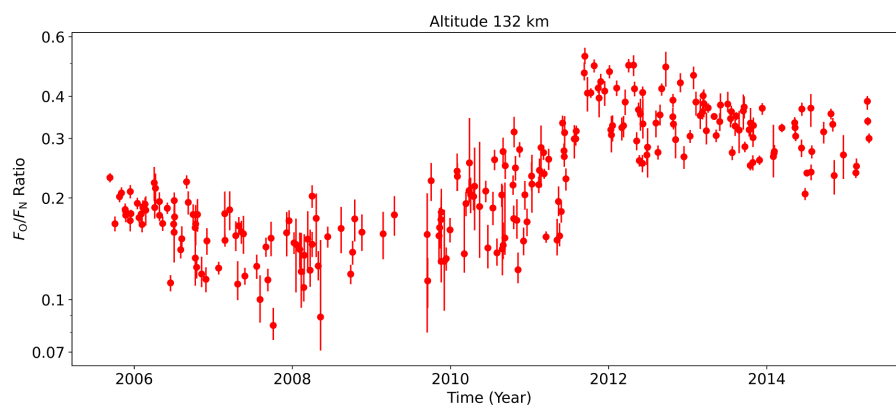


図3.25: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度132 km

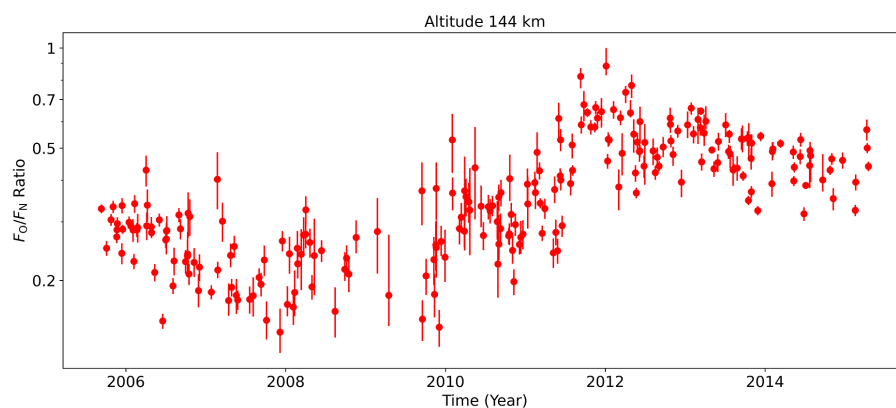


図3.26: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度144 km

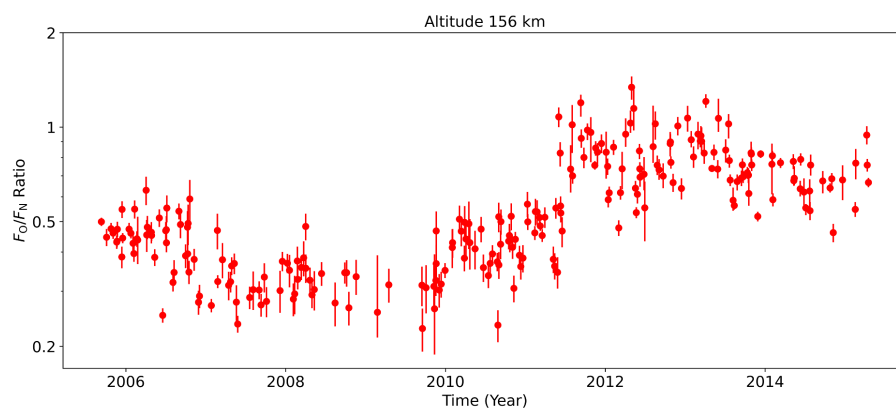


図3.27: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度156 km

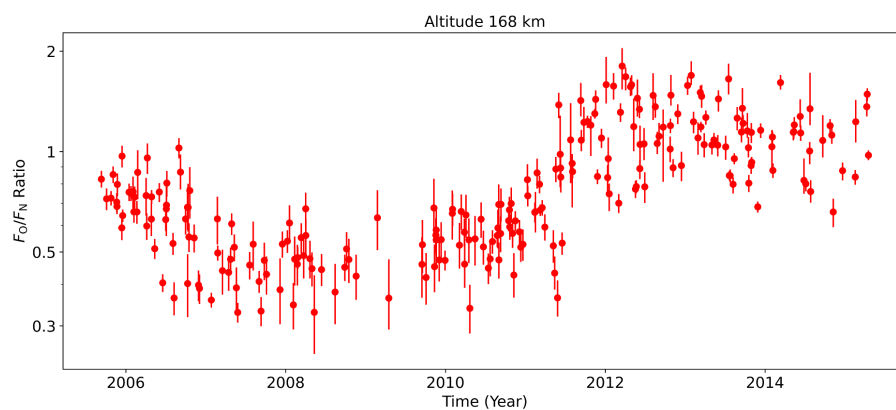


図3.28: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度168 km

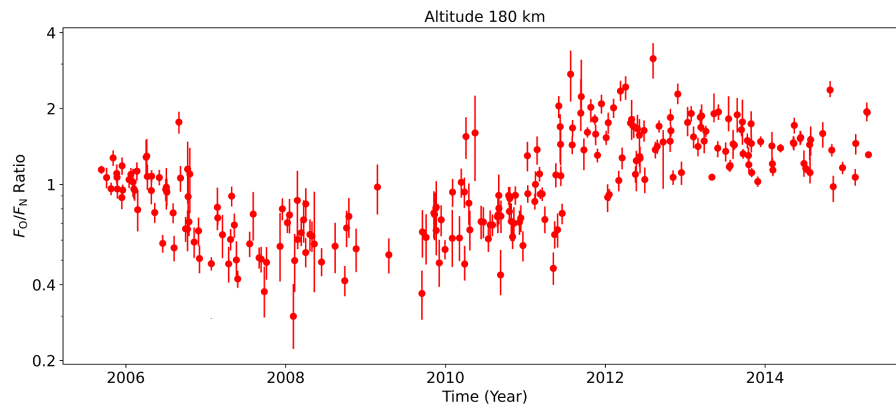


図3.29: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度180 km

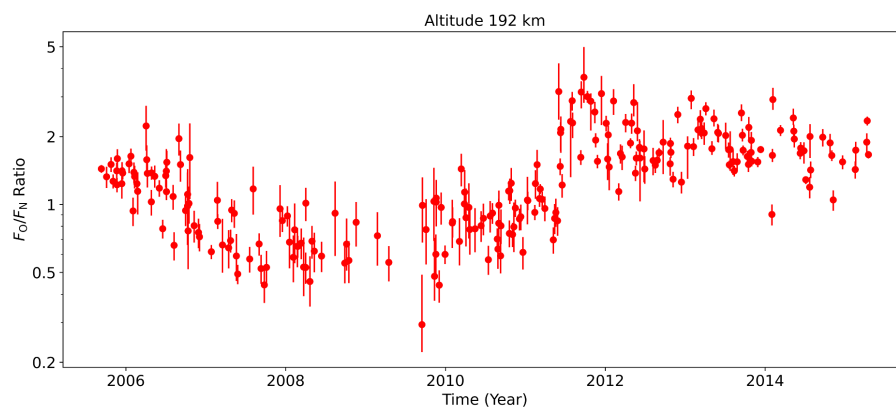


図3.30: 酸素/窒素 Flux 比の長期変動: 高度192 km

3.4 XIS の系統誤差評価

「すざく」は天文衛星であり、本来の目的ではない地球観測は想定されていないため、非常に明るい昼地球観測時のデータは天体観測時とは異なる較正の不定性の影響を受ける可能性がある。この節では、本研究で用いた XIS の昼地球観測データの系統誤差評価を行う。

森田修論 [9] では輝線の幅に注目し、電荷転送効率と光漏れ量^{*9}の2つの較正評価を行った。結果として、低エネルギーかつ非常に明るい昼地球観測データにおいても適切な較正が行われていることが確認された。本研究では、電荷注入機能および Grade 判定法が2つの輝線に与える影響を評価する。

^{*9} 可視光の入射による波高値の変動を補正すること。

3.4.1 電荷注入機能の系統誤差

2.2.2項で述べたように、すざく/XISには電荷転送効率を回復するための電荷注入機能（SCI）が搭載されている。図3.31に、FI-CCDとBI-CCDそれぞれのSCI機能が動作した期間と注入電荷量を示す。BI-CCDであるXIS1は2006年11月に2keV相当の電荷注入を開始し、2011年6月には6keV相当に増加させた。その他のFI-CCDは2006年11月に6keV相当の電荷注入を行い、運用を続けた。

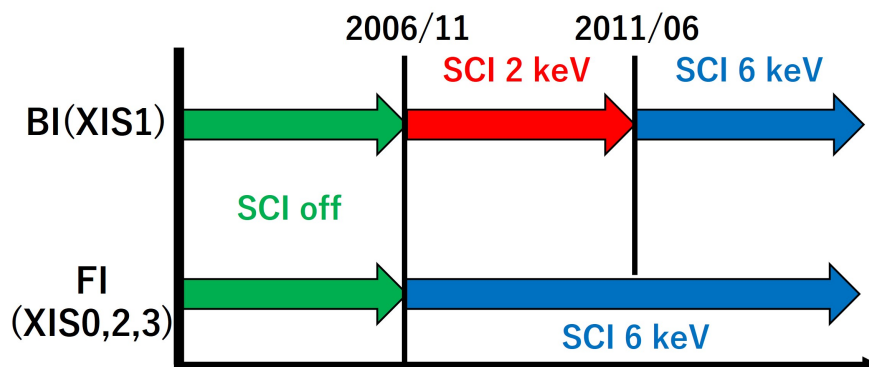


図3.31: SCI 機能の運用期間

しかし、このSCI機能には、CI行の後ろ2列で電荷漏れが発生し、バックグラウンドのカウントレートが増加するという問題が報告されている [40]。昼地球観測データにも、SCI機能に関する未発見・未解決の較正の不定性が存在する可能性がある。本項では、3.3節で行った解析において、SCI機能による系統誤差が各パラメータに与える影響を評価する。

輝線中心

まずは、図3.32と図3.33に酸素及び窒素輝線の輝線中心値の長期変動を示す。一見すると、「輝線中心値も有意な長期変動を示している」と解釈できる。しかし、これはSCI機能によるCTEの改善を表している。格子欠陥が生じて電荷がトラップされると、失われた電荷が多いほど、輝線の中心エネルギーが見かけ上小さくなる^{*10}。酸素、窒素ともに、打ち上げから時間経過とともに輝線中心値が低下し、CI量が6 keVに設定されたことでCTEが回復し、明確なジャンプが確認される。

^{*10} 信号が小さくなることで、読み出された電荷量に基づいて計算されるエネルギーが低く見積もられてしまうため

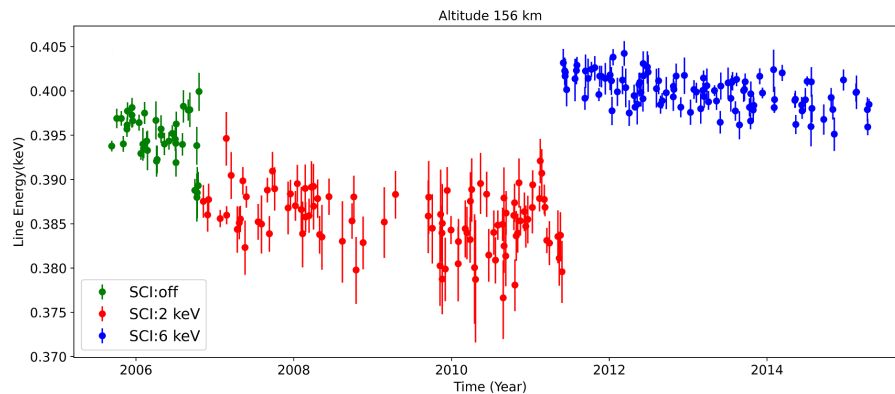


図3.32: 高度156 km における窒素輝線中心値の長期変動。緑: SCI 機能 off、赤: CI 量2 keV、青: CI 量6 keV のデータ

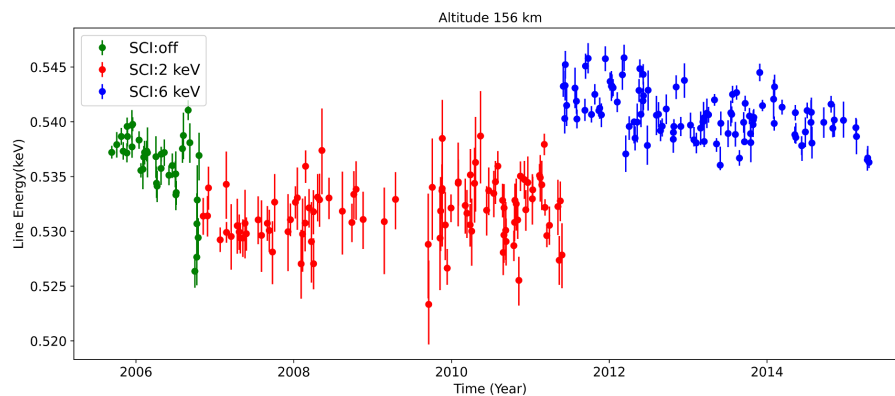


図3.33: 高度156 km における酸素輝線中心値の長期変動

SCI 行の除去範囲の拡大

このように輝線中心値に加えて、XIS1 の昼地球観測データには系統誤差が含まれている可能性も考えられる。次に、SCI 機能がオンとなっている時期のデータは、電荷漏れによる影響を無くすために、デフォルトで SCI 行の前後 2 ピクセルのデータは除去されている。しかし、この除去範囲が十分でない可能性があるため、除去範囲を 4 ピクセルに拡大し、同様の解析を行った結果を図3.34、3.35に示す。ただし、イベント数確保のため、スペクトル抽出高度領域は 50–180 km とした。なお、SCI 行は、ACTY = 52, 106, 160, 214, 268, 322, 376, 430, 484, 538, 592, 646, 700, 754, 808, 862, 916, 970, 1022. である。この解析方法を採用しても、長期変動の振る舞いに変化は見られないことが確認された。

FI-CCD の酸素 Flux

次に、FI-CCD の XIS0 における酸素 Flux を確認する。FI-CCD では、窒素輝線が不明瞭であることが多いが、酸素輝線であれば Flux の推定が可能である。図3.31のように、FI-CCD は CI 量が 2 keV の期間は存在しないため、SCI 機能によって Flux が変動しないのであれば、図3.7と同じような長期的な変動が見られるはず

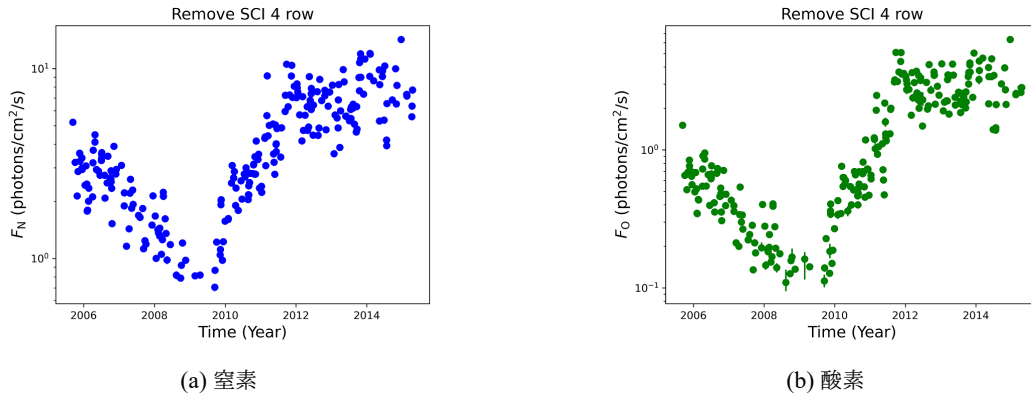


図3.34: SCI 行前後 4 列を除いた Flux の長期変動

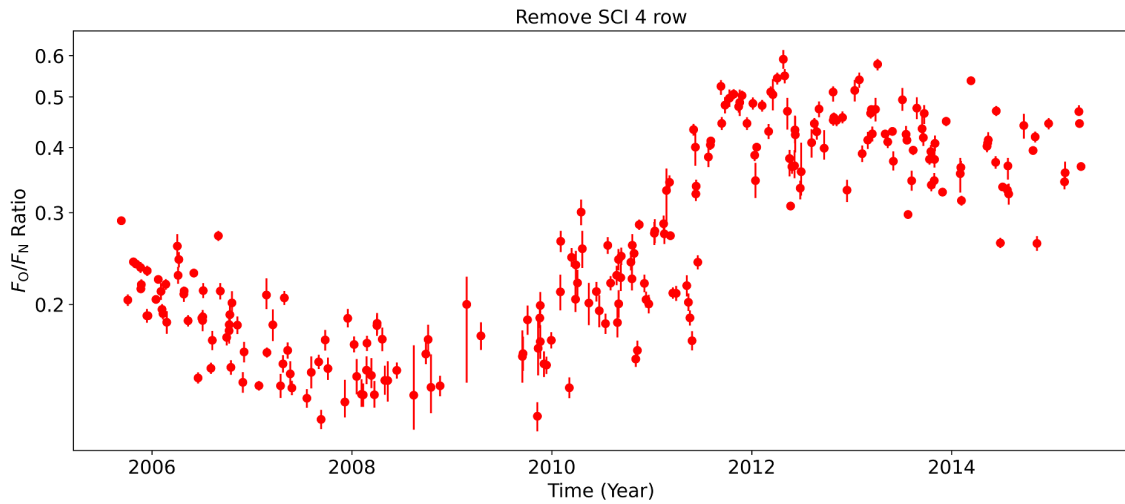


図3.35: SCI 行前後 4 列を除いた酸素/窒素 Flux 比の長期変動

である。

図3.36は、3.3.1と同様の解析を XIS0 で行った結果である。ただし、統計を改善するために、積分する高度区間を 96–216 km に設定した。図3.7に見られる長期的な変動と同様の傾向が確認できることがわかる。図3.37は、縦軸に XIS0 データの酸素 Flux(F_O^{XIS0})、横軸に高度 96–216 km の XIS1 データの酸素 Flux(F_O^{XIS1}) をプロットしたものである。Pearson の積率相関係数 (Correlation coefficient)^{*11}は $r \simeq 0.94$ と非常に強い相関を示しており、このことから、Flux の長期変動には SCI 機能による系統誤差は無視できると考えられる。注意すべきは、ピンクのラインは F_O^{XIS1} の対数フィットを表し、XIS1 と XIS0 の酸素 Flux は純粋な 1 対 1 対応となっていない点である。傾向としては $F_O^{XIS0} > F_O^{XIS1}$ 、つまり XIS0 の有効面積が XIS1 と比べ、小さく見積もられている傾向がある。

*11 詳細は4.2.1項を参照

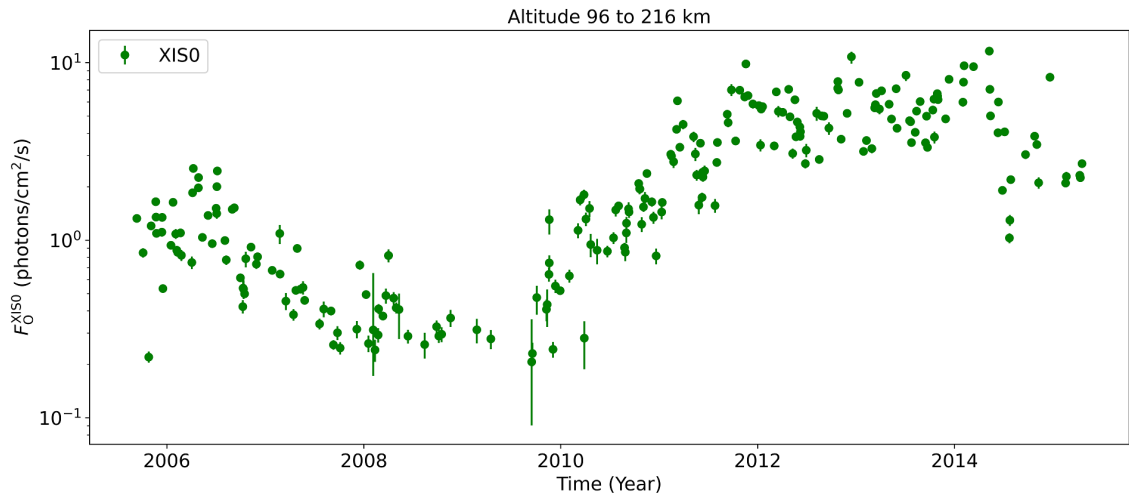


図3.36: XIS0 の酸素 Flux の長期変動

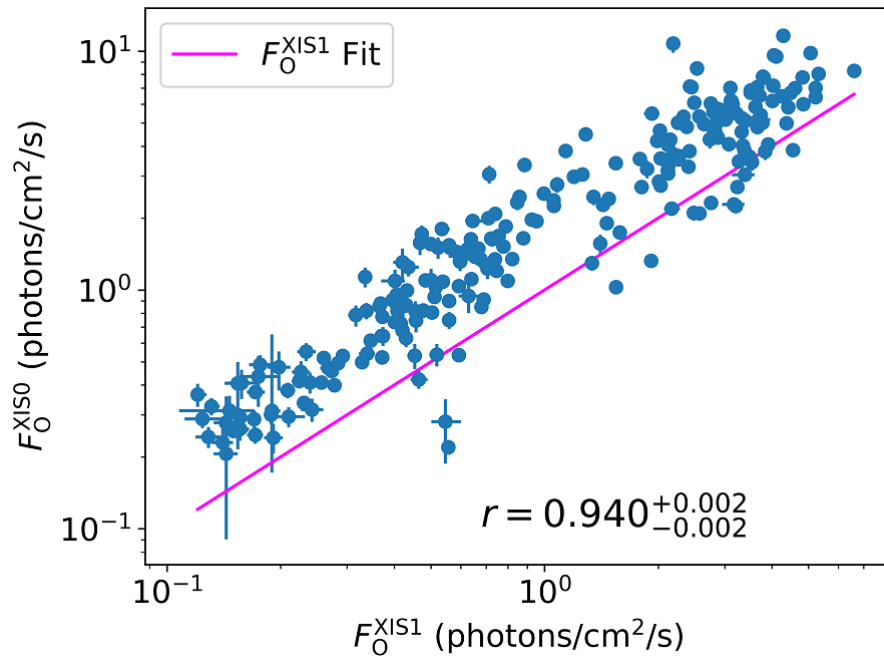


図3.37: XIS0 酸素 Flux(F_O^{XIS0}) と XIS1 酸素 Flux(F_O^{XIS1}) の相関

FI-CCD の酸素/窒素 Flux 比

FI-CCD にも2.2.3項で述べた Event threshold を下げた運用をした観測データが存在する。このデータで酸素/窒素 Flux 比が推定可能か調査する。Event threshold を下げた運用をした観測データは、[XIS config parameters \(submode IDs\)](#)に記載された FI-CCD の Event threshold を下げた Config parameters を[DARTS/Astro Query System](#)で検索し、さらにその中から昼地球観測を行ったデータを選別した。観測データのリストは付録 Bに記載している。

まず、OBS ID:700007020 の昼地球観測データのスペクトルを図3.38a に示す。これは縦軸を有効面積で割ったプロットであり、FI と BI で窒素輝線の Norm が全く異なることがわかる。さらに同じ FI でも XIS0 と XIS3 でもスペクトルの形状に違いがあることも確認できる。図3.38b には、OBS ID:700007020 (MCG-6-30-15) の通常の GTI (Good Time Interval) における天体データの低エネルギー帯域のスペクトルを示している。領域は図3.40のように設定され、バックグラウンドは xisnxbgen を用いて NXB を推定し、引き算している。天体観測データにも昼地球観測データと同様の傾向が見られる。

これらの結果から、Event threshold を下げて運用した場合でも、低エネルギー帯域でのコンタミネーション^{*12}の較正が適切に為されていない可能性が考えられる。IACHEC 2014 [41] の XIS チームによる資料でも、FI-CCD のコンタミネーションの較正は ≈ 0.4 keV までであり、FI-CCD による正確な昼地球の酸素/窒素 Flux 比推定が難しいと考えられる。

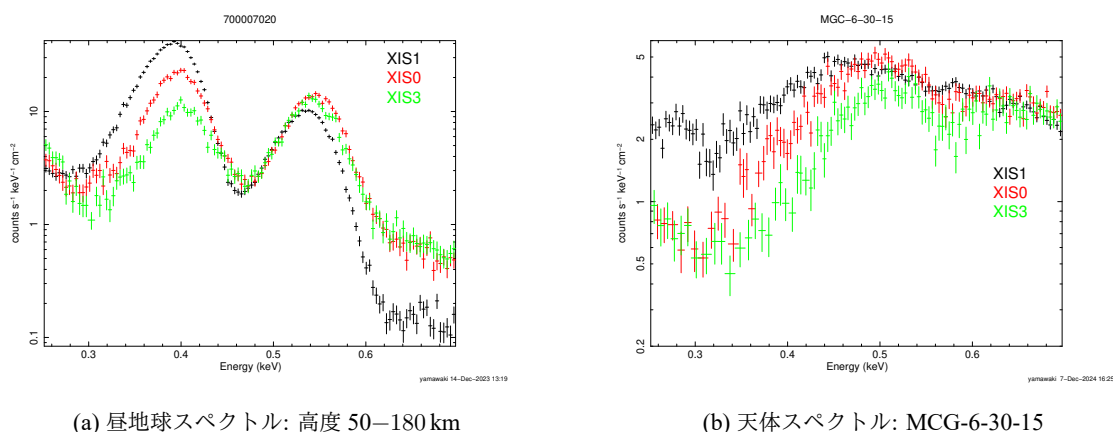


図3.38: OBS ID:700007020 昼地球スペクトルと天体スペクトルの FI スペクトルと BI スペクトルの比較

しかし、Flux および Flux 比の絶対値に不定性があってもその長期変動を見れば、つまり FI-CCD データでも 2011/06 の BI-CCD の CI 量 (6 keV) 変更時期前後の酸素/窒素 Flux 比のジャンプが確認できれば、BI-CCD においても長期変動の CI 量依存性は無いと判断できる。3.40は酸素/窒素 Flux 比の長期変動を、BI-CCD のエラー範囲を赤、XIS0 データを青、XIS3 データを緑で表したプロットである。FI-CCD と BI-CCD で Flux 比の値は大きく異なるが、BI-CCD データの CI 量 (6 keV) 変更時期前後のジャンプが FI-CCD データでも確認できる。

^{*12} 冷却して運用する検出器にアウトガス等が吸着し、有効面積が減少する

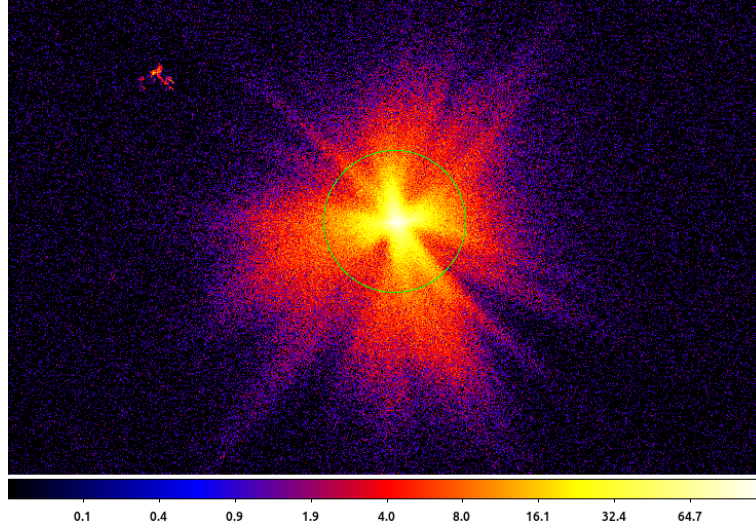


図3.39: MCG-6-30-15 のスペクトル抽出領域

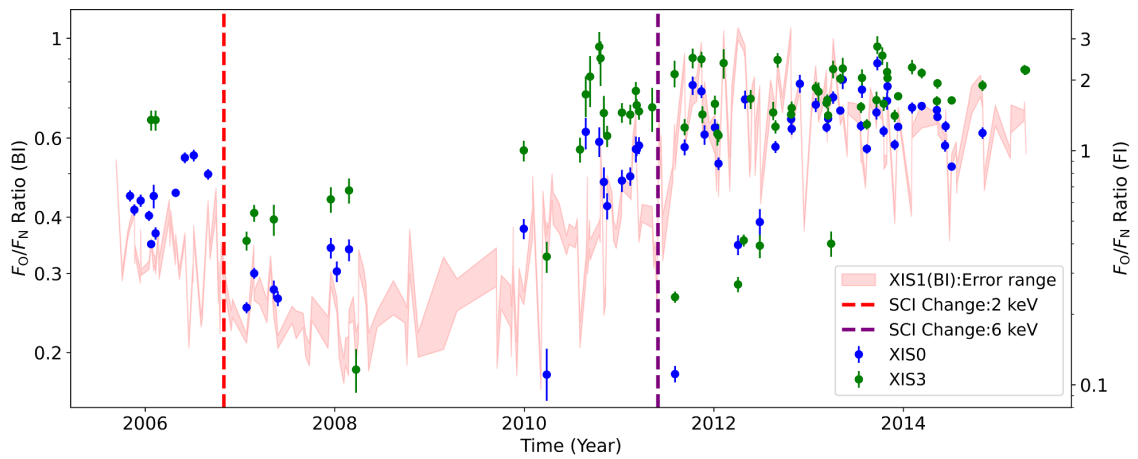


図3.40: BI-CCD と FI-CCD の酸素/窒素 Flux 比の長期変動。青: XIS0、緑: XIS3、赤の領域: XIS1 のエラー範囲、破線は BI-CCD の CI 量変更時期

3.4.2 Grade 分岐比

さらに、SCI 機能の前後で XIS1 の Grade 分岐比が変化することが、酸素/窒素 Flux 比に影響を与える可能性があるため、これについても調査を行う。図3.41は、昼地球観測中に XIS1 で判定された X 線イベントの Grade0, 2, 3, 4, 6 の分岐比を時系列でプロットしたものである。各 Grade 分岐比 R_{G_i} ($i = 0, 2, 3, 4, 6$) は、以下の式で表される。ただし、 N_{G_i} は Grade G_i に対応するカウント数である。

$$R_{G_i} = \frac{N_{G_i}}{\sum_i N_{G_i}} \times 100(\%)$$

CI 量が変わったことによる、Grade 分岐比の有意な変化は見られない。

さらに、23 個の通常の日体観測データにおいても Grade 分岐比を調査した。図3.42は、GTI 中の XIS1 で判定された X 線イベントの Grade0, 2, 3, 4, 6 の分岐比を時系列でプロットしたものである。こちらの結果でも、CI 量の変化による Grade 分岐比の有意な変化は見られなかった。このことから、SCI 機能が Grade 分岐比に与える影響はないと考えられる。

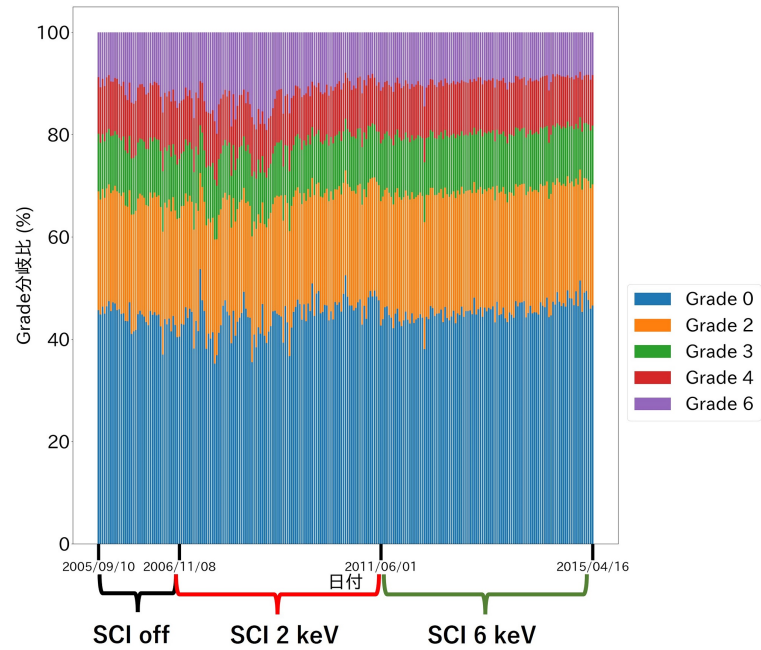


図3.41: 昼地球データの Grade 分岐比

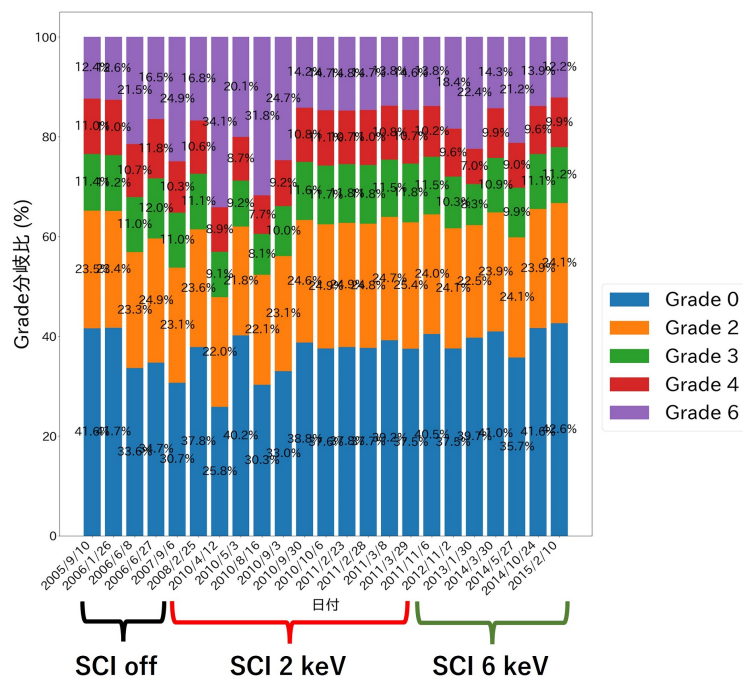


図3.42: 天体データの Grade 分岐比

また、図3.43、3.44に Grade0(純粋な X 線イベント) のイベントのみを使い解析を行った結果を示す。3.3節の長期変動と同様の時間変動を見せていることがわかる。

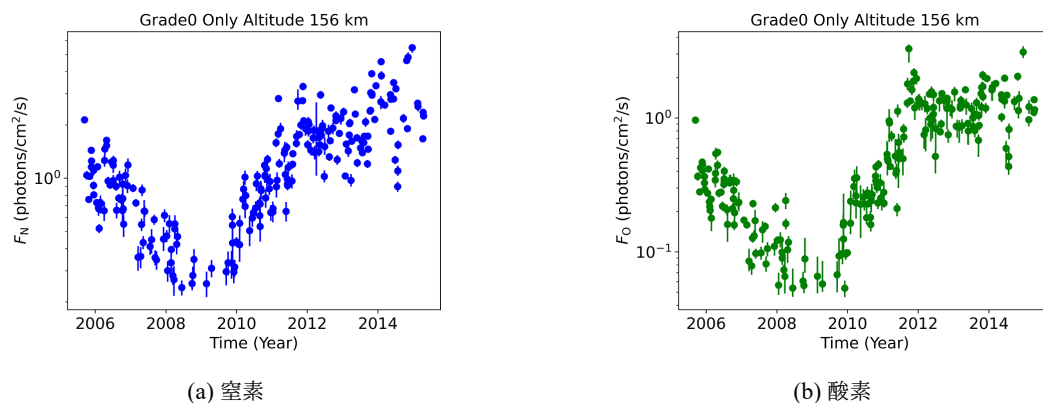


図3.43: Grade0 イベントのみの高度156 km における Flux の長期変動

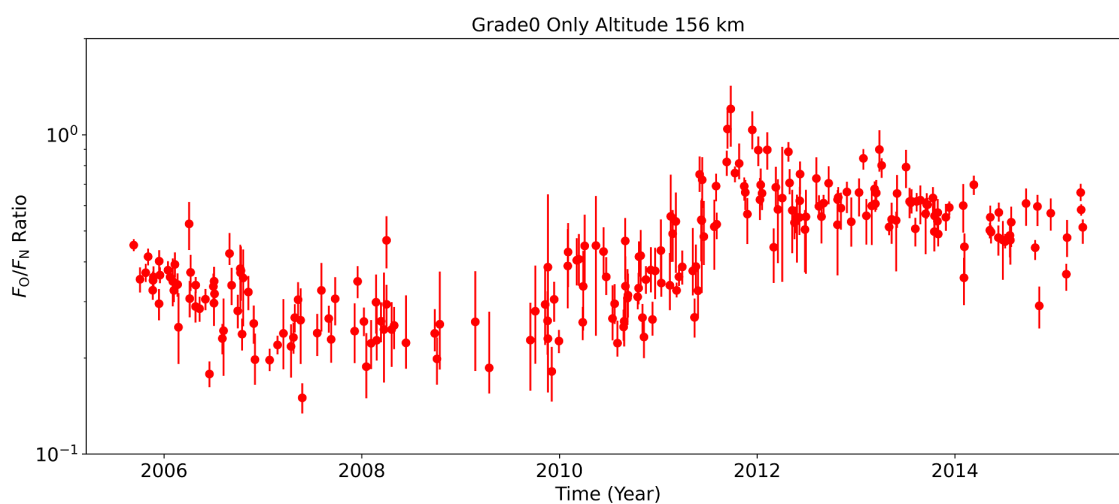


図3.44: 高度156 km における酸素/窒素 Flux 比の長期変動

以上、SCI 機能が Flux や酸素/窒素 Flux 比に与える影響を評価するために繰り返し解析を行ったが、Flux や酸素/窒素 Flux 比の長期変動には有意な変化は見られなかった。したがって、SCI 機能が酸素/窒素 Flux 比に与える影響は無視できると判断し、以降の議論ではその影響を考慮しないこととする。

3.4.3 ダークレベルの補正の評価

今回解析するデータは宮崎大学 [42] が XIS のダークレベル^{*13}を補正したイベントファイルを用いている。この補正は今回のように明るい地球を観測しているデータに有効な補正であり、特に低エネルギー側のスペクトルに対し大きな効果がある。図3.45に OBS ID 100019030 の 96 km – 120 km の補正前後^{*14}のスペクトル、表3.3にそれぞれのベストフィットパラメータを示す。補正により輝線がシャープになり、フィッティングが改善することがわかる。

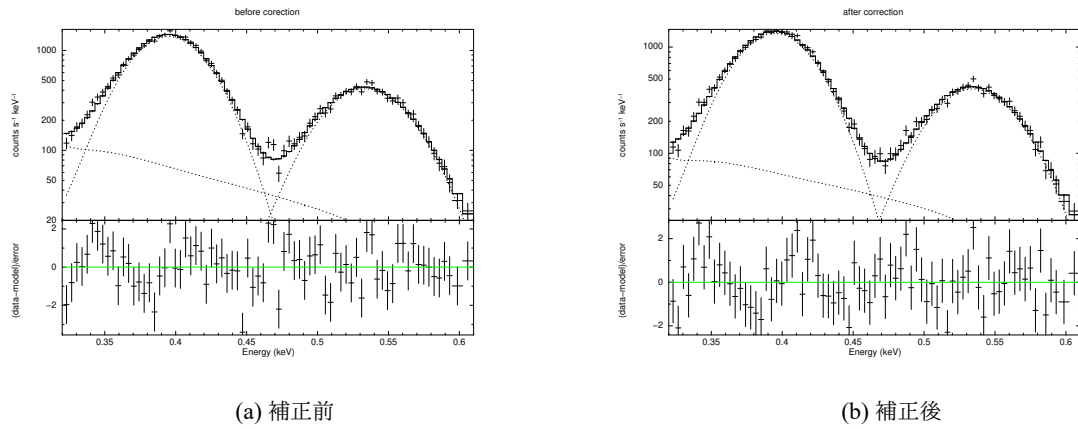


図3.45: ダークレベルの補正

パラメータ	窒素	酸素
E_l [keV]	$0.3934^{+0.0005}_{-0.0005}$	$0.5368^{+0.0008}_{-0.0008}$
σ [keV]	0.0142(frozen)	0.0153(frozen)
F	$8.235^{+0.132}_{-0.133}$	$1.436^{+0.040}_{-0.040}$
$\chi^2/d.o.f$		1.3029(100.32/77)

(a) 補正前

パラメータ	窒素	酸素
E_l [keV]	$0.3933^{+0.0005}_{-0.0005}$	$0.5377^{+0.0008}_{-0.0008}$
σ [keV]	0.0148(frozen)	0.0149(frozen)
F	$8.179^{+0.131}_{-0.132}$	$1.409^{+0.040}_{-0.040}$
$\chi^2/d.o.f$		1.1661(89.79/77)

(b) 補正後

表3.3: ダークレベルの補正前後のベストフィットパラメータ

^{*13} pixel に何も入射していないときのレベル (読み出しノイズと暗電流を足した波高値)。pixel ごとに定義され、SAA 通過後や観測モード変更後に更新される。

^{*14} 補正前のデータはDARTSで配布されているパブリックデータ

第 4 章

議論

1.4にまとめたように、熱圏下部の分子状窒素数密度 $[N_2]$ と原子状酸素数密度 $[O]$ ^{*1}の比; $\Sigma[O]/[N_2]$ は TIMED/GUVI や SES-14/GOLD ミッション等の紫外線衛星で観測されてきた^{*2}。この $\Sigma[O]/[N_2]$ の地域、地磁気、季節等による変動について複数の先行研究で研究されている。表4.1にこれら一部の先行研究を関連するパラメータ別にまとめる^{*3}。

今回用いる「すざく」の昼地球観測データには様々な制約がある。まず、観測地点の緯度は「すざく」の軌道傾斜角の範囲内 $\pm 32^\circ$ で、ローカルタイムは約 8–16 hour の範囲内である。1つの OBS sequence は十分なイベント数を確保するために、複数周回の積分値となっており、この複数周回内では観測地点の緯度とローカルタイムはあまり変動しないが、経度は SAA 上空を除きばらつく。各 OBS sequence の観測地点の情報は付録 Aを参照のこと。

本章では、まず4.1節で酸素/窒素比の緯度・ローカルタイム依存性について述べる。4.2節で3.3節で見られた酸素・窒素 Flux と酸素/窒素 Flux 比の長期変動の原因について考察する。4.3節では酸素/窒素 Flux 比と電離大気との関係性を評価する。

^{*1} 以降、化学種 X の数密度を $[X]$ で表す。

^{*2} 紫外線の大气透過可能高度では O と N_2 が主な化学種のため (図1.2; 図1.4)。

^{*3} 緯度と季節、経度とローカルタイムはそれぞれ同一のパラメータを指し示すように見えるが、緯度と経度については時間平均された $\Sigma[O]/[N_2]$ で議論がされているため注意。

表4.1: $\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ の先行研究

$\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ との 依存性が調査さ れたパラメータ	観測装置・ミッション名	論文
ローカルタイム	TIMED/GUVI	Zhongli Li et al., 2024. [43]
緯度・経度	TIMED/GUVI, NCAR TIE-GCM モデル	Liyang Qian et al., 2016. [44]
	TIMED/GUVI	Jahanzeb Khan et al., 2022. [45]
季節	TIMED/GUVI	Jia Yue et al., 2019. [46]
	TIMED/GUVI	R. R. Meier et al., 2014. [47]
	SES-14/GOLD	Liyang Qian et al., 2022. [48]
	TIMED/GUVI	A. G. Burns et al., 2015. [49]
太陽活動	NCAR-GMM モデル	
	NCAR TIE-GCM モデル	Zhongli Li et al., 2022. [51]
	TIMED/GUVI	Yuchao Zhang et al., 2011. [50]
圧力 (高度)	TIMED/GUVI	Jia Yue et al., 2019. [46]

4.1 緯度・ローカルタイム依存性

本節では MSIS モデルによるシミュレーションにより、酸素/窒素比の緯度・ローカルタイム依存性を確認する。図4.1から図4.8に MSIS-2.0 で 2013/07/01 00:00:00(UTC) のときの酸素/窒素数密度比 $\Sigma([\text{O}] + [\text{O}_2])/([\text{N}] + [\text{N}_2])$ を緯度 0° 、経度 0° を中心としたときのプロットを示す。各高度については「すざく」解析と同様に、96–120 km、108–132 km、120–144 km、…、180–204 km と区間24 km で数密度を積分している。また、F10.7 は 116.8、Ap 指数は 1 で固定している。

酸素/窒素 Flux 比の季節依存性、ローカルタイム依存性については、特徴的な変動は見られなかったため付録 C、付録 Dに置く。

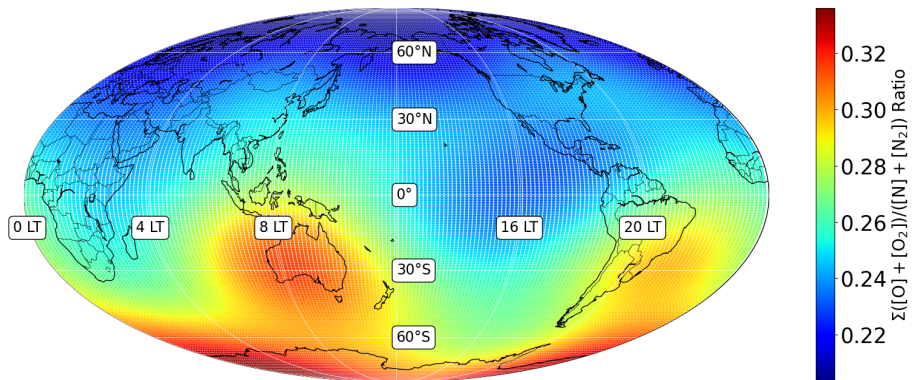


図4.1: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度108 km

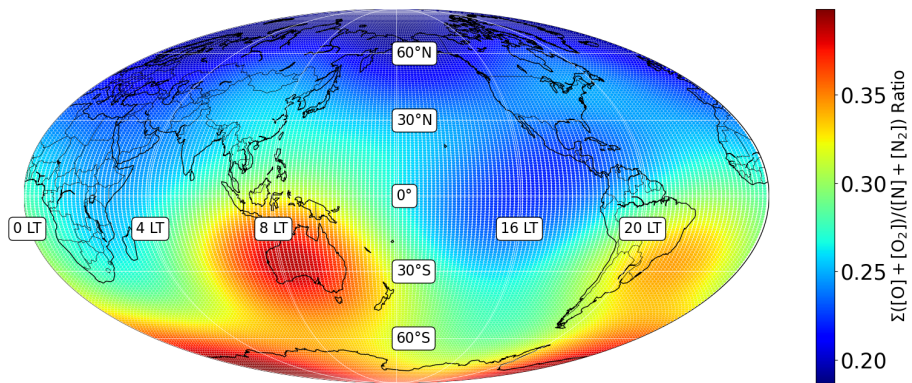


図4.2: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0)

: 高度120 km

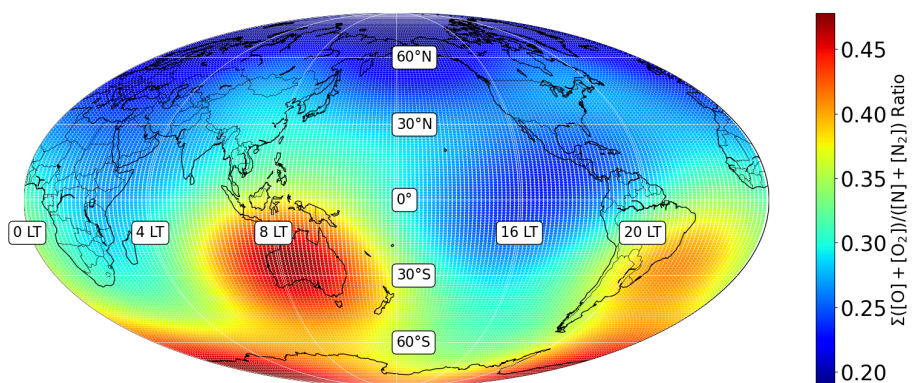


図4.3: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度132 km

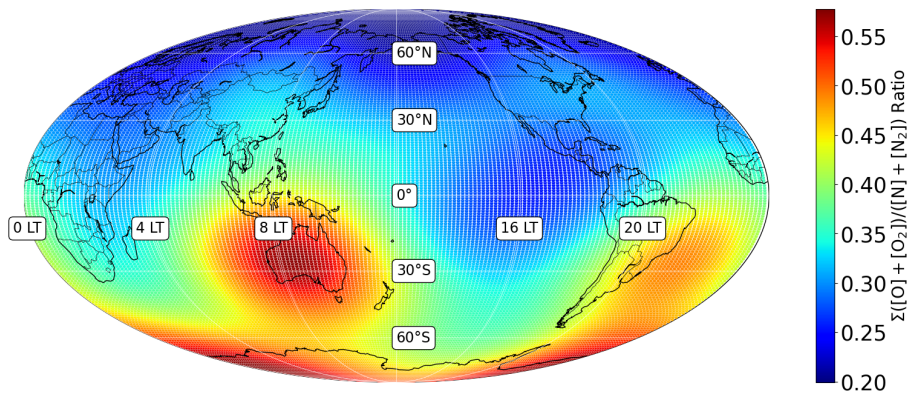


図4.4: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度144 km

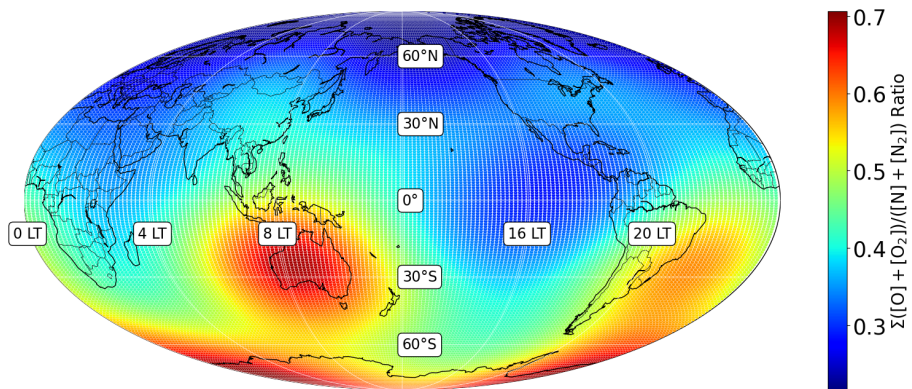


図4.5: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度156 km

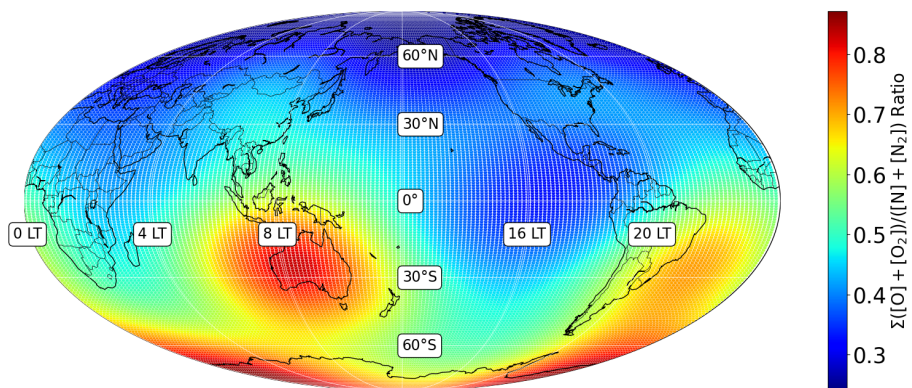


図4.6: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度168 km

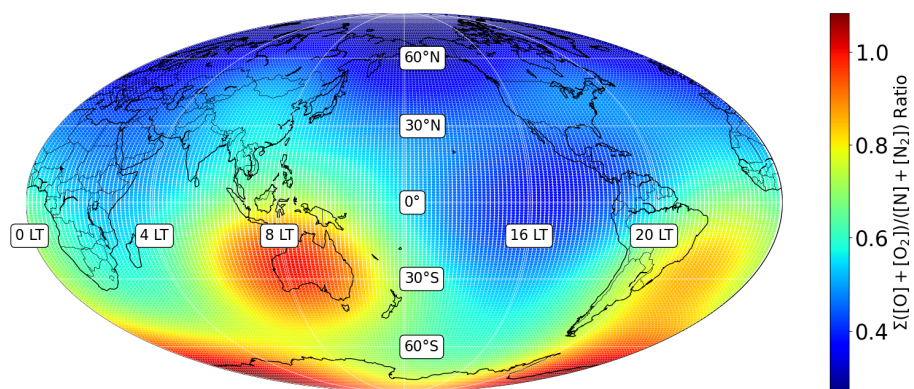


図4.7: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度180 km

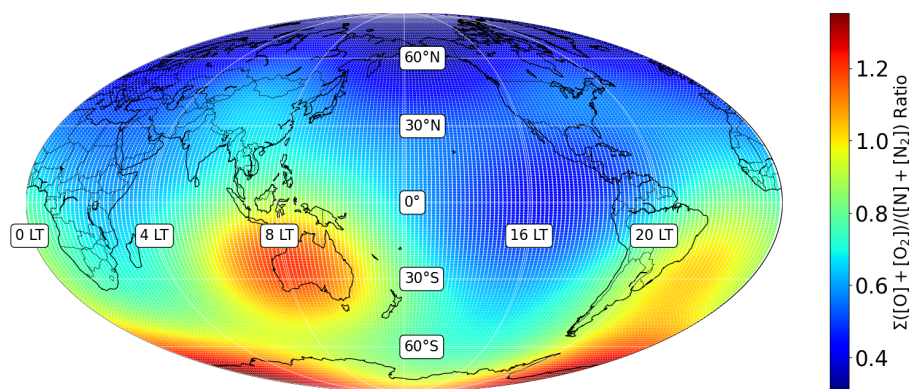


図4.8: 酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性 (MSIS-2.0): 高度192 km

またこの条件で「すざく」が観測し得る範囲内における、酸素/窒素数密度比の変化率マップを図4.9から図4.16に示す。基準点を緯度 0° 、経度 0° にとった、緯度 $j(^\circ)$ 、経度 $k(^\circ)$ の変化率 $RoC_{j,k}$ は酸素/窒素数密度比を $R_{j,k}$ として、以下の式で計算される。

$$RoC_{j,k} = \frac{R_{j,k} - R_{0,0}}{R_{0,0}} \times 100(\%)$$

酸素/窒素数密度比の緯度・ローカルタイム依存性は上空に行くにつれ顕著であるが、高度192 km(図4.16)では「すざく」が観測し得る範囲内において最大 100% もの変動が予測される。3 章の「すざく」観測の各高度の酸素/窒素 Flux 比も緯度とローカルタイムによって変動する可能性があるが、以下の議論では補正等行わずに、この観測地域による不定性を含めたまま進める。

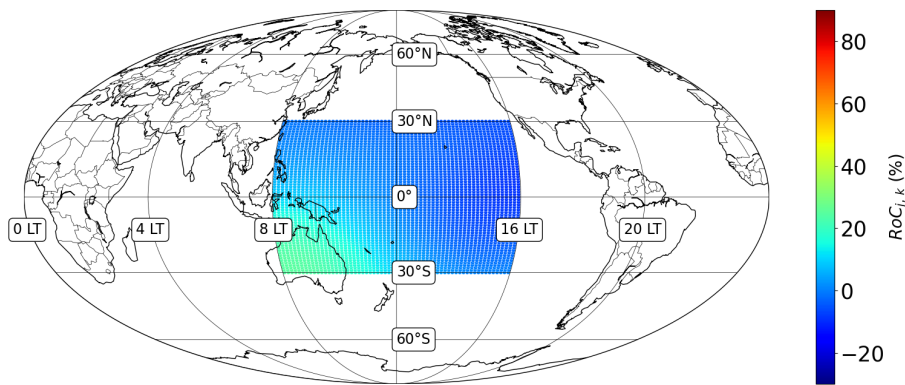


図4.9: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度108 km

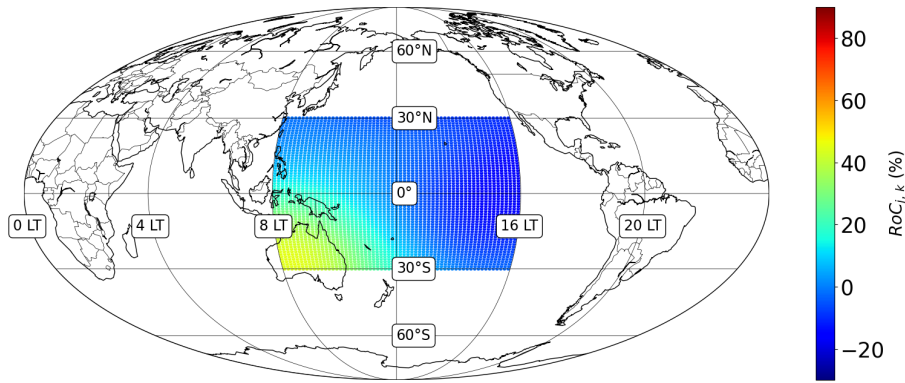


図4.10: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度120 km

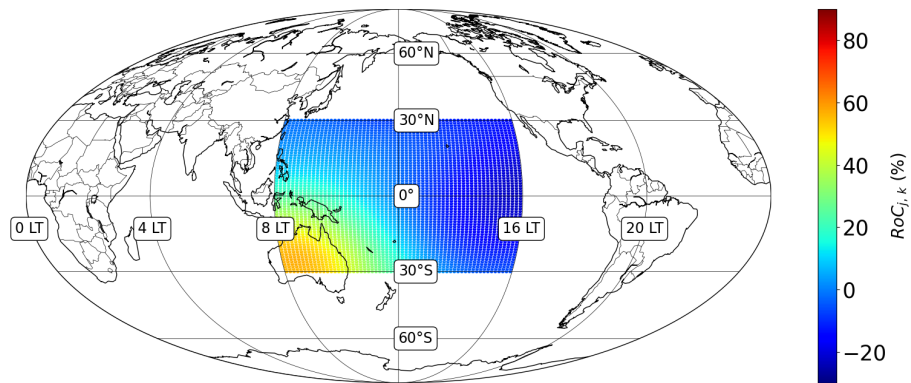


図4.11: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度132 km

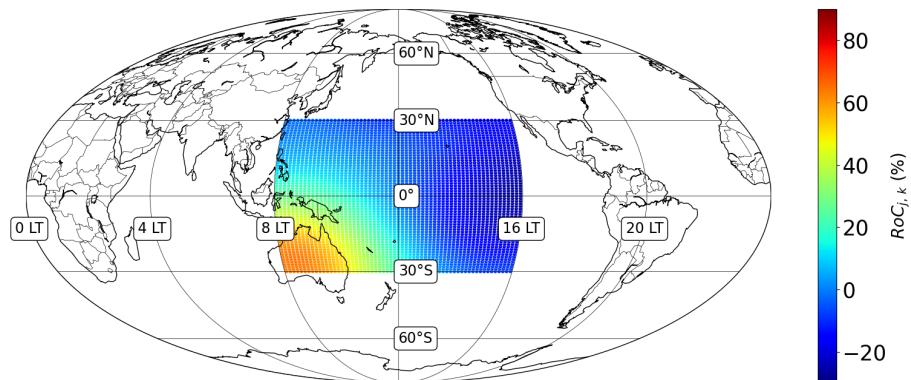


図4.12: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度144 km

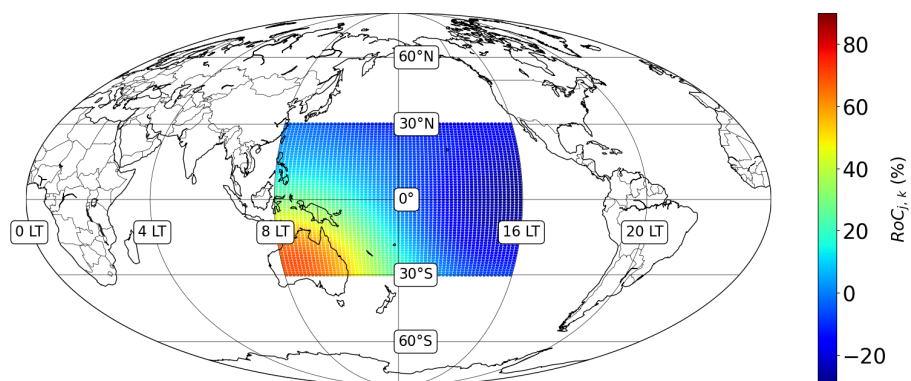


図4.13: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度156 km

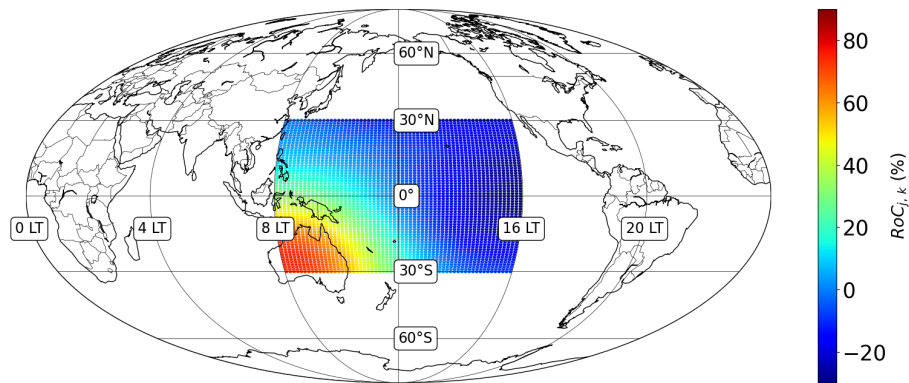


図4.14: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度168 km

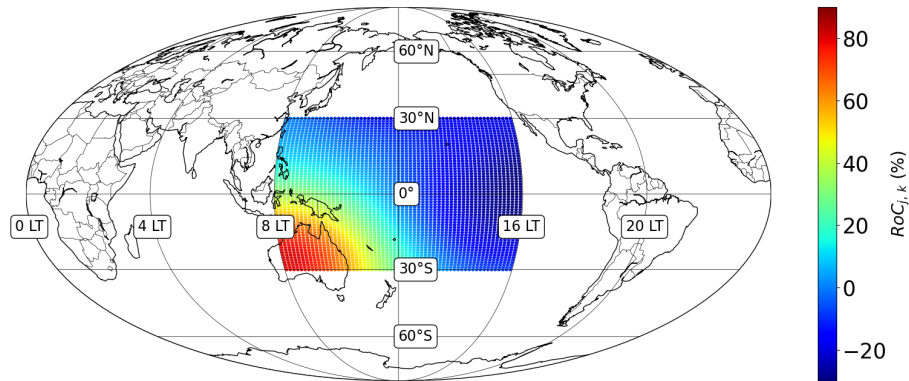


図4.15: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度180 km

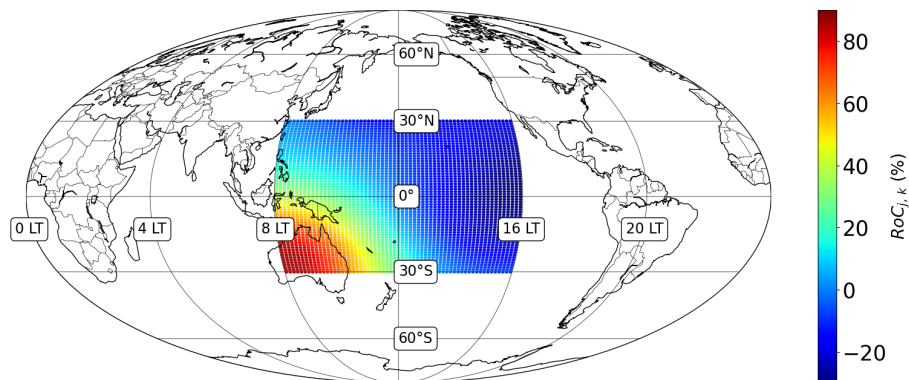


図4.16: 酸素/窒素数密度比の変化率マップ (MSIS-2.0): 高度192 km

4.2 太陽活動 11 年周期依存性

1.1.3項で述べたように、太陽活動は約 11 年の周期で変動する。図4.17に今回太陽活動の指標として用いる、Geostationary Operational Environmental Satellite; GOES シリーズ/X-Ray Sensor; XRS が観測した太陽 X 線 Flux の 2005 年 9 月から 2015 年 4 月までの長期変動である。図4.17に示したプロット点の数は「すざく」データ数と同じ 239 点である。Flux 値は「すざく」OBS sequence の全周回期間 (e.g. 90 分毎、8 周回) の算術平均値となっている。なお、使用した X 線 Flux データの波長は 0.1–0.8 nm(エネルギー換算 $\approx 1.5\text{--}12\text{ keV}$) である。

GOES 衛星のデータはNational Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA の HPより入手可能。GOES 衛星はこの長期間に図4.18のように数回の代替わりをしているため、太陽極小期に現れている観測下限値が異なっている点に注意。

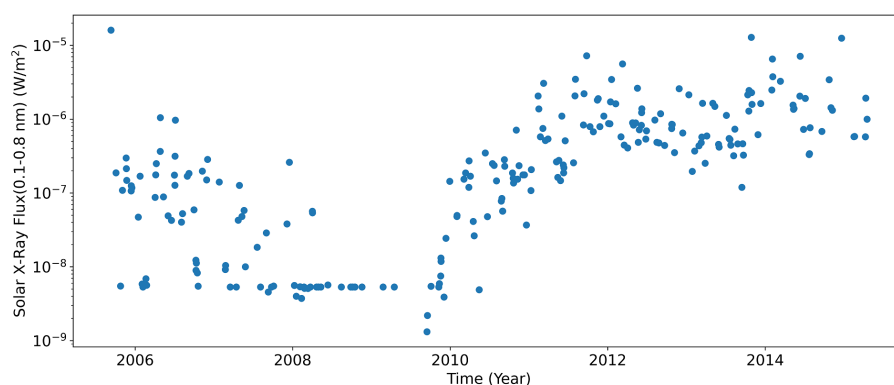


図4.17: 太陽 X 線 Flux(0.1–0.8 nm) の長期変動

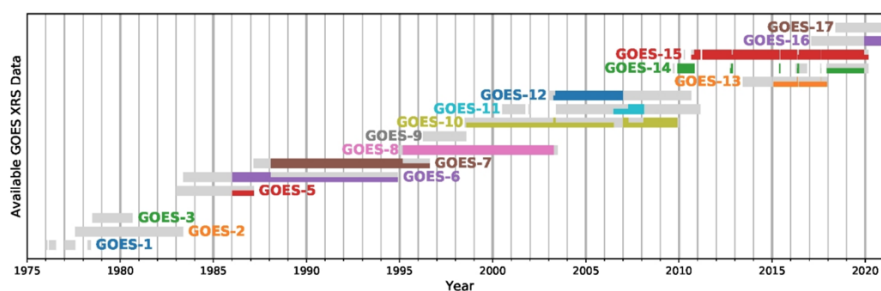


図1.1975年から2021年までのXRSデータの主衛星（太線）および副衛星（細線）GOES。GOES-13の測定は長年不安定だったが、2014年後半以降は安定した。XRSデータは1974年までさかのぼるが、1986年以前の主衛星と副衛星の呼称は不明である。

図4.18: GOES シリーズの運用期間 [52]

4.2.1 窒素・酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関

まず、縦軸に窒素・酸素 Flux、横軸に太陽 X 線 Flux の相関プロットを図4.19から図4.34に示す。また2つのパラメータ間の相関を定量的に調べるために、Pearson の積率相関係数 r_X ($X = \text{Oxygen, Nitrogen}$) を導入する。ただし、個々の X 種 Flux と太陽 X 線 Flux を $F_{X,i}$, $F_{\text{Solar},i}$ とし、対数変換後の値を用いる。 $\overline{\log F_X}$, $\overline{\log F_{\text{Solar}}}$ は対数変換後の平均値である。また、各 Flux の誤差の範囲内でランダムにモンテカルロシミュレーション (試行回数=1,000,000) を行うことで、相関係数のエラー範囲を決めた。

「すざく」観測 Flux と太陽 X 線 Flux は全ての高度で $r_X \simeq 0.9$ 程度の強い正の相関を見せており、これは太陽からの電磁放射が強くなることで、超高層大気領域で多く光電吸収が起こると直感的に理解できる。

$$r_X = \frac{\sum_i (\log F_{X,i} - \overline{\log F_X})(\log F_{\text{Solar},i} - \overline{\log F_{\text{Solar}}})}{\sqrt{\sum_i (\log F_{X,i} - \overline{\log F_X})^2} \sqrt{\sum_i (\log F_{\text{Solar},i} - \overline{\log F_{\text{Solar}}})^2}}$$

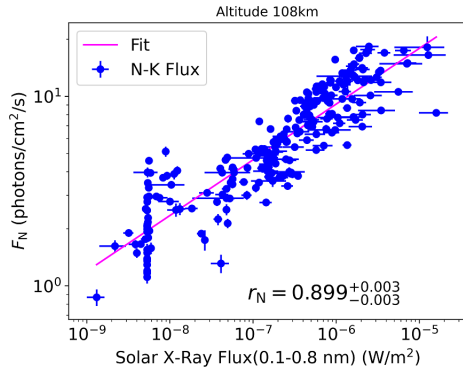


図4.19: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度108 km

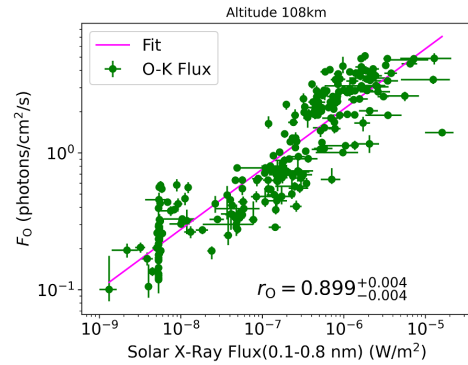


図4.20: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度108 km

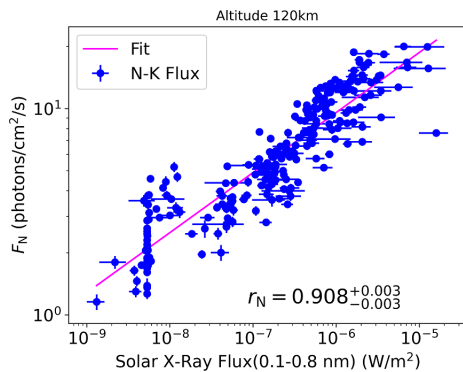


図4.21: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度120 km

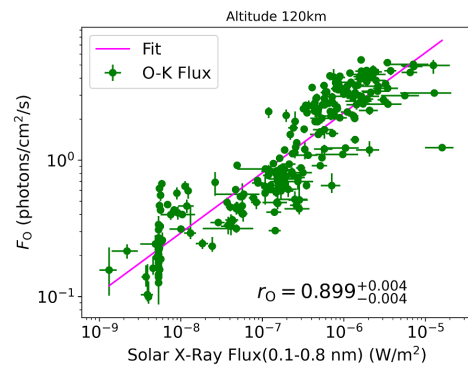


図4.22: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度120 km

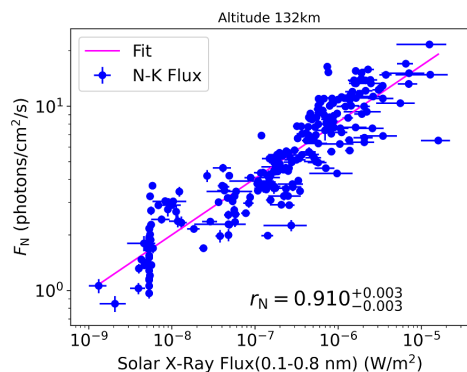


図4.23: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度132 km

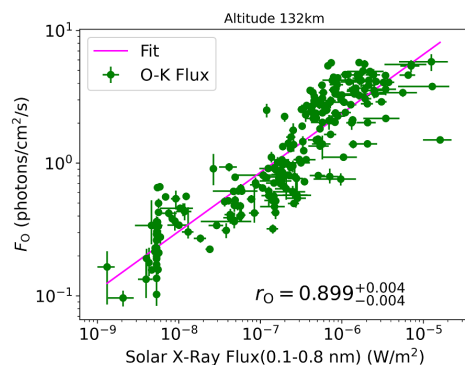


図4.24: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度132 km

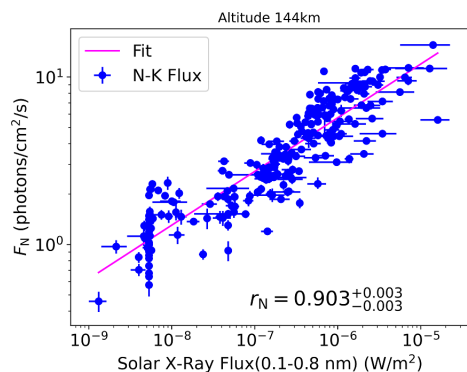


図4.25: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度144 km

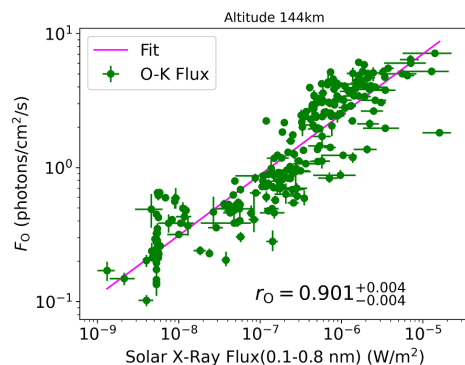


図4.26: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度144 km

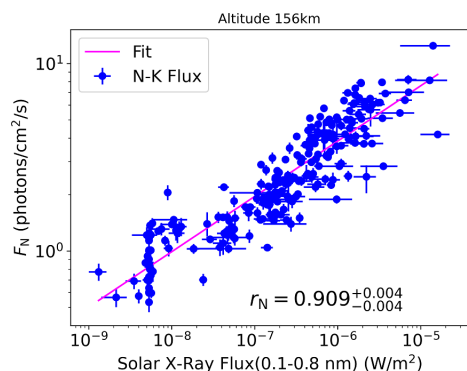


図4.27: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度156 km

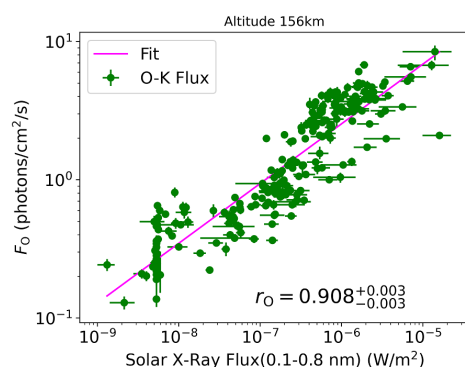


図4.28: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度156 km

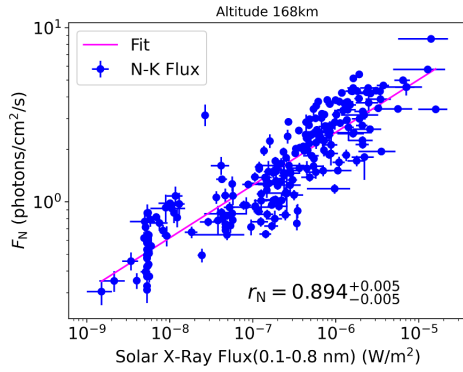


図4.29: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度168 km

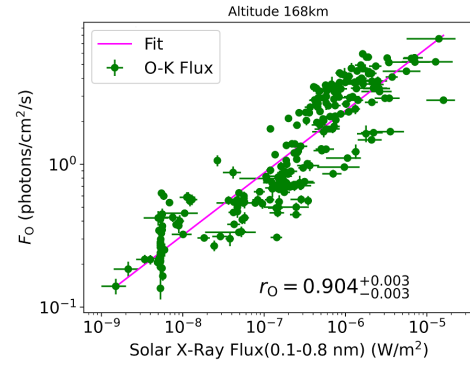


図4.30: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度168 km

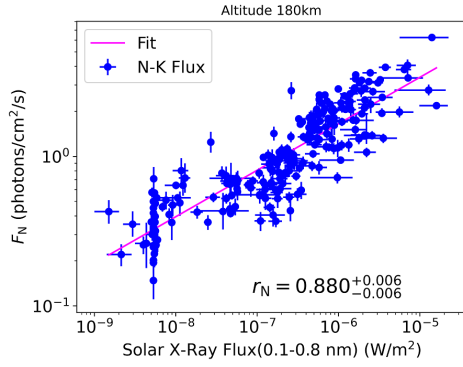


図4.31: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度180 km

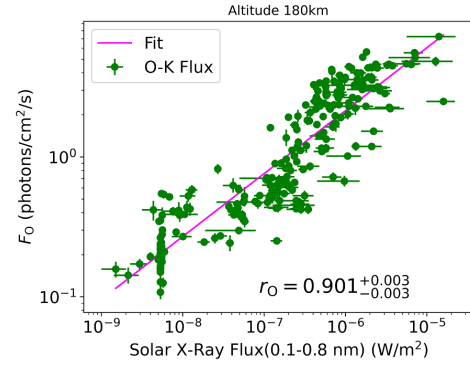


図4.32: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度180 km

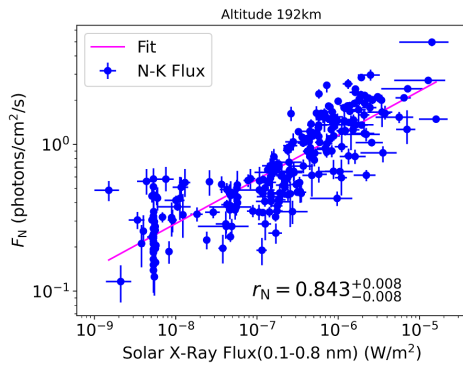


図4.33: 窒素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度192 km

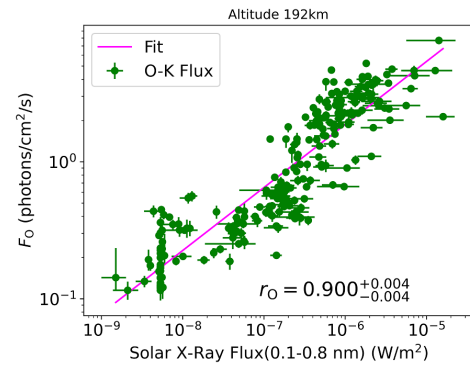


図4.34: 酸素 Flux と太陽 X 線 Flux の相関:
高度192 km

4.2.2 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関

酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関プロットを図4.35から図4.42に示す。個々の酸素/窒素 Flux 比を $R_{O/N,i}$ とし、Flux と同様に、対数変換した値を用い相関係数 $r_{O/N}$ を算出する。 $\overline{\log R_{O/N}}$ は対数変換後の平均値である。

$$r_{O/N} = \frac{\sum_i (\log R_{O/N,i} - \overline{\log R_{O/N}})(\log F_{\text{Solar},i} - \overline{\log F_{\text{Solar}}})}{\sqrt{\sum_i (\log R_{O/N,i} - \overline{\log R_{O/N}})^2} \sqrt{\sum_i (\log F_{\text{Solar},i} - \overline{\log F_{\text{Solar}}})^2}}$$

これまで紫外線観測と大気モデルによる先行研究で $\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ と太陽活動の相関、「太陽活動が増加すると $\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ が増加する」ことが報告されているため [49] [50] [51] [46]、「すぎく」観測データでもこの現象が確認できるか調査する。

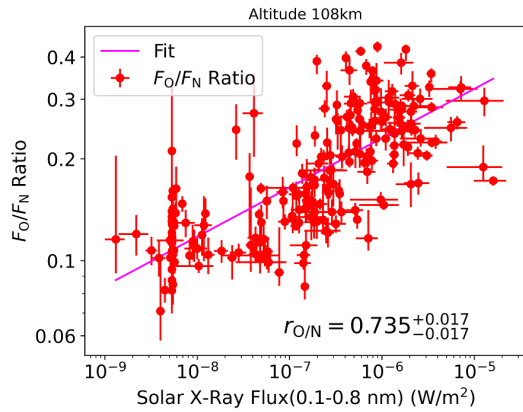


図4.35: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度108 km

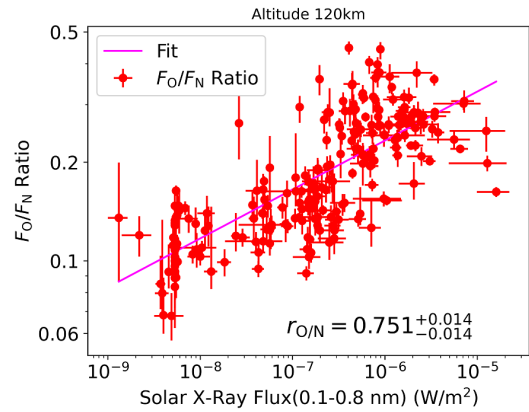


図4.36: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度120 km

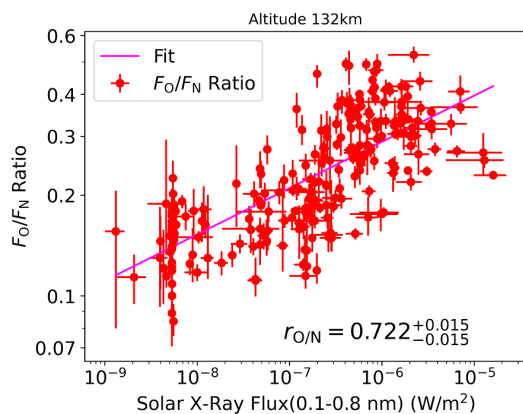


図4.37: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度132 km

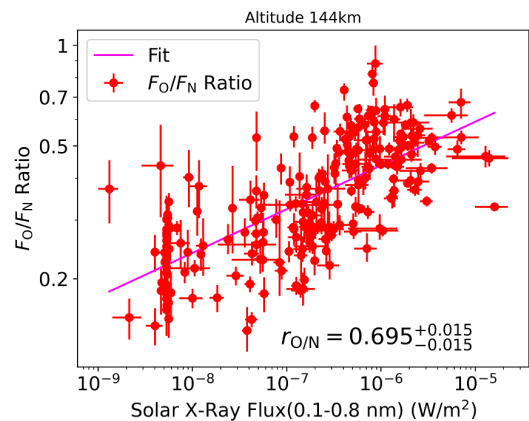


図4.38: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度144 km

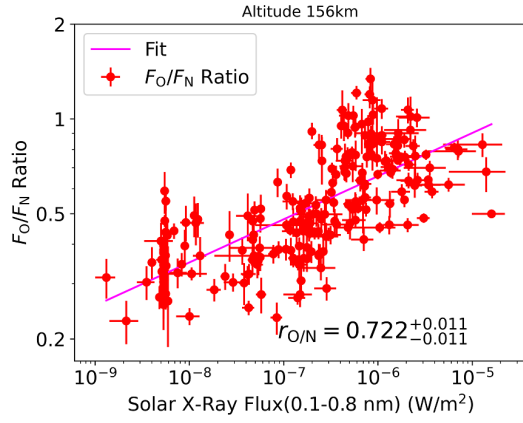


図4.39: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度156 km

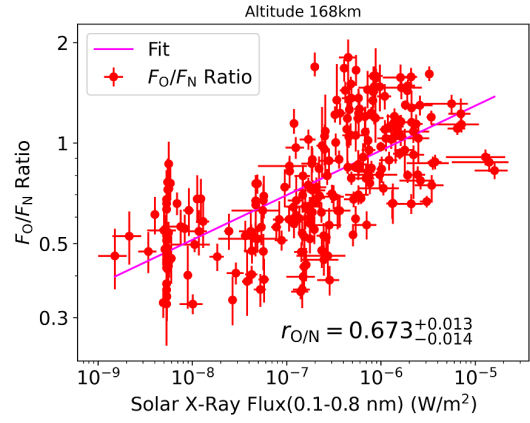


図4.40: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度168 km

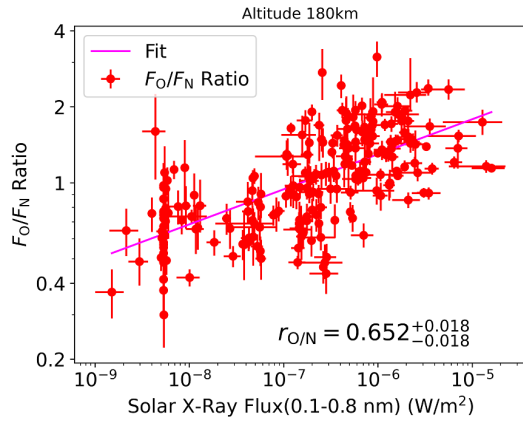


図4.41: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度180 km

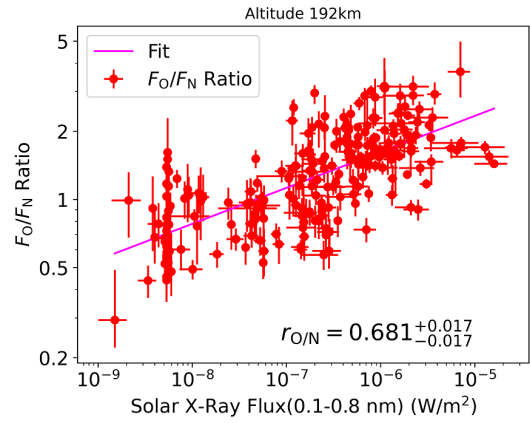


図4.42: 酸素/窒素 Flux 比と太陽 X 線 Flux の相関:
高度192 km

相関係数は $r_{O/N} \simeq 0.7$ 程度のゆるい正の相関を見せている。図4.43に縦軸に高度、横軸に算出した相関係数をプロットする。紫外線による先行研究で解析されていたのは高度約140 km 以上の領域であるが、それ以下の高度でも酸素/窒素 Flux 比が太陽 X 線 Flux と正の相関を見せている。ここから、X 線天文衛星「すざく」による X 線大気観測によって、大気観測可能高度を下げたとともに、大気組成が高度約100 km の熱圏下部領域まで太陽活動の影響を受けることを発見したと言える。

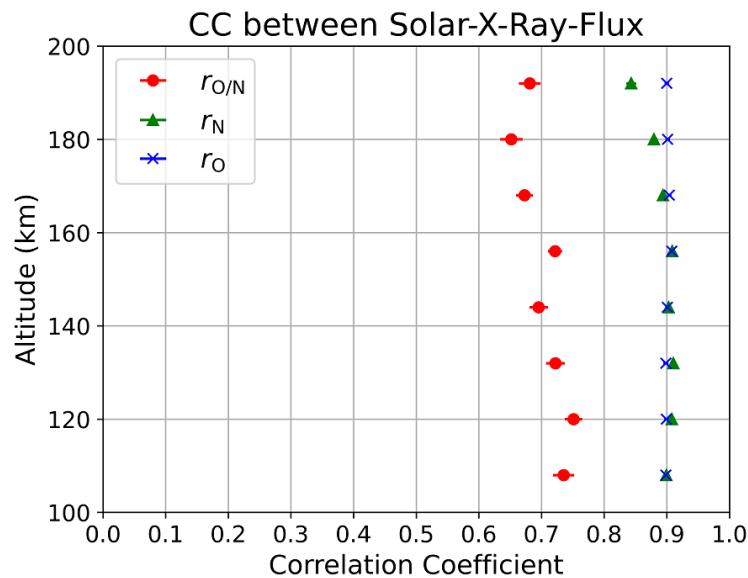


図4.43: 各パラメータと太陽 X 線 Flux 間の相関係数

ただし、今回の結果には注意すべき事項が4点存在する。

1. 観測する化学種の不定性; 3.2.4項で述べたように CCD のエネルギー分解能では、酸素と窒素の原子、分子、イオンの状態を見分けることはできない^{*4}。しかし、図1.5のように今回の観測高度にはO とO₂ が混合しているため、後述する太陽活動と $\Sigma[O]/[N_2]$ の正の相関の仮説では説明できない可能性がある。
2. Flux 測定の不定性; 3.2.1で触れたように、観測した Flux は視線方向に積分された値であり、実際の観測高度領域からの放射を推定するには、その上の高度からの放射を全て取り除く必要がある^{*5}。また、酸素の2次吸収についても考慮する必要がある。
3. 数密度比ではなく Flux 比であること; 先行研究では O(135.6 nm; 134.3–137.7 nm) やN₂ ライマン・バーger・ホップフィールド (LBH) 分子バンドの放射から数密度が算出されているが、今回の結果は Flux を数密度に変換していない。 $\simeq 100$ km の低高度ではO₂ が多量にあるが、O₂ からの放射は単純にO の2倍と観測されるため、紫外線観測の $\Sigma[O]/[N_2]$ とはズレる。
4. 観測地域の不定性; 4.1節で述べたように酸素/窒素数密度比には地域依存性があり、Flux 比も同様に依存すると仮定した場合、各データ点が統計誤差を超えて上下する可能性がある。

これらの不定性を考慮した議論が必要であるが、観測地域の不定性以外は酸素/窒素 Flux 比の絶対値に関する

^{*4} 原子と分子の輝線中心値は2 eV 程度しか変わらない。

^{*5} deprojection(3次元化)と呼ぶ。銀河解析で用いられる手法

事項であり、これらが長期的にみた相対的変動の結果に影響を与えることはないと考えられる。観測地域の不定性についても、低高度では $\pm 15\%$ 程度の変動であり、統計誤差と同時に考慮しても正の相関が見えなくなるほどの変動ではない。先行研究の結果と consistent であることを踏まえると、酸素/窒素 Flux 比の太陽活動依存性はリアルな現象であると考ええる。この酸素/窒素比と太陽活動の相関、「太陽活動が増加すると酸素/窒素比が増加する」現象の理由については、先行研究でいくつかの仮説が立てられている。以下にこれらの仮説を紹介する。

Reference Height の変化

Yuchao Zhang et al., 2011 [50] では TIMED/GUVI の 2002 年から 2007 年までの太陽周期の半分にわたる TIMED/GUVI の観測データから、日平均・全球平均 $\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ と太陽 Extreme Ultraviolet 放射の関係を評価した。図4.44の散布図を見ると $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ は季節、地磁気、ローカルタイムの影響を受けながら、これらと同等の影響を太陽周期から受けている。Yuchao Zhang., 2011 は太陽活動極大期から極小期へ移行するとき、正味の $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ 変化は約 40% あると見積もっている。

図4.45は UTC(12:00)、緯度 41° 、経度 0° 、 $A_p = 1$ の条件で F10.7 Flux を 50 から 320 で動かしたときの MSIS86 モデルの結果である。黒線は $N_{2\text{-column}} = 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ となる高度区間における $\Sigma[\text{O}]/[\text{N}_2]$ を示し、赤線は $N_{2\text{-column}} = 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ を固定した時の Reference Height を示している。両者の F10.7 依存性が類似していることから、 $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ の変動が主にこの大気熱膨張 (収縮) による Reference Height の変化に起因すると説明している。つまり、 $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ の高度分布はそのままに、大気が熱膨張し上空へと輸送されるという仮説を提唱している。一方で、地磁気嵐時には大気加熱により局所的な $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ が低下することが知られている [53]。この2つの大気加熱プロセスの $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ 変動の違いは、空間領域の大きさ (局所的か全球的か)、オーロラと加熱の時間スケール (太陽活動による加熱はゆっくりと進む)、熱圏のダイナミクス (非平衡か平衡か) の違いに起因すると結論付けている。

しかし、後の Strickland, D. J., J. S. Evans, and J. Correia (2012) [54] により、「Yuchao Zhang et al., 2011 がリモートセンシングした $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ で見た変化のより可能性の高い説明は、O の光解離による生成、拡散と対流による輸送、および化学再結合であり、”固定 N_2 柱密度の Reference Height を変更する熱膨張または収縮”ではない」と、この仮説は否定されている。

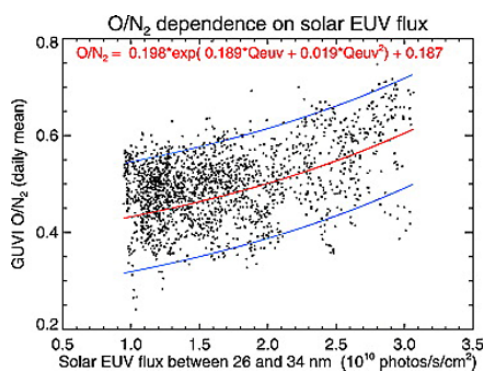


図4.44: GUVI Disk の日平均・全球平均 O/N_2 と太陽 EUV Flux の散布図。赤線は O/N_2 と EUV Flux のフィット曲線。青い線は標準偏差 [50]

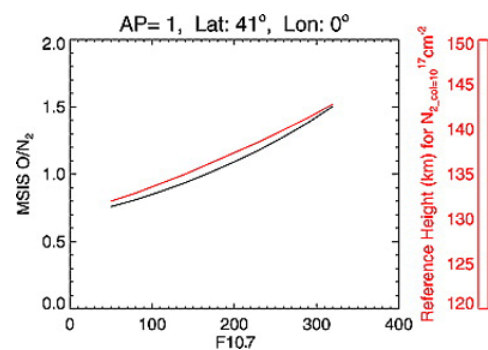


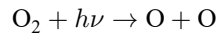
図4.45: F10.7cm フラックスに対する O/N_2 (黒線) と Reference Height ($N_{2\text{-column}} = 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 、赤線) の依存性 [50]

化学プロセス

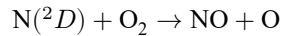
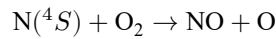
Zhongli Li, Xiaoli Luan et al., (2022) [51] では熱圏電離圏大循環モデル (TIE-GCM) によるシミュレーションから、太陽放射変動に対する $[O]/[N_2]$ の応答に対する様々な物理的・化学的プロセスの寄与を定量的に調べた。シミュレーションの結果、化学プロセスが太陽活動の増加とともに熱圏 $[O]/[N_2]$ を増加させることが示唆され、この増加は熱圏下部 (~ 150 km) と上部熱圏のそれぞれにおいて、O アバンダンスの Production と N_2 アバンダンスの Loss が支配的であった。これは以下の化学式で表される。これらの Production Rate、Loss Rate が卓越していることが、熱圏下部 $[O]/[N_2]$ の太陽活動依存性の理由であると述べられている。ここで基準圧力 $P_0 = 5 \times 10^{-4}$ mbar、 P を地表面の圧力として圧力レベル $Z_p = \ln(P_0/P)$ を定義し圧力座標系で評価する。

• Production Reactions of O

- $Z_p < -4$: O_2 の光解離



- $Z_p = -4$ から $Z_p = -2$: N と NO、 O_2 との反応



• Loss Reactions of N_2

- $Z_p < -2$: O^+ と N_2 の電荷交換

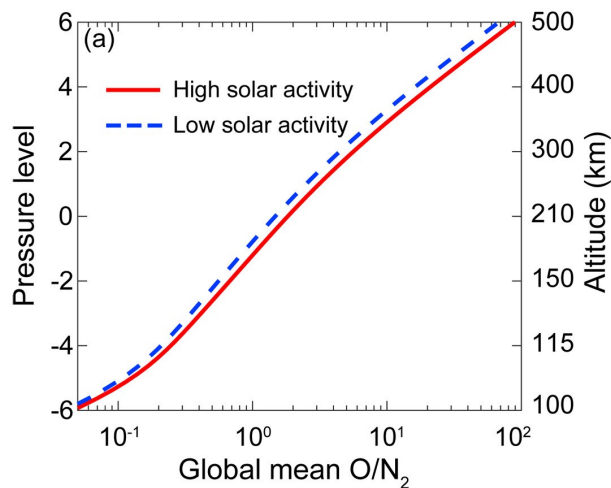
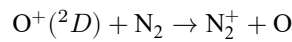
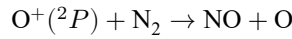


図4.46: 12 月までの太陽活動度が高い時 (赤実線) と低い時 (青点線) の全球平均 $[O]/[N_2]$ [51]

熱力学的プロセス

A. G. Burns et al., (2015) [49] および Jia Yue et al., (2019) [46] では一定圧力面での [O]、[N₂] の太陽活動との逆相関 (図4.48～図4.50)、太陽活動が増加すると数密度が減少する理由を理想気体の法則と静水圧平衡により説明している。

$$P = \rho RT \propto \frac{n_X M_X}{N_A} RT$$

$n \cdots X$ 種の数密度 (/m³)

$M_X \cdots X$ 種の原子量または分子量 (g/mol)

$N_A \cdots$ アボガドロ定数 (6.022×10^{23} /mol)

$R \cdots$ 気体定数 ($8.31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} / \text{mol}$)

$T \cdots$ 気温 (K)

$P \cdots$ 気圧 (Pa)

太陽活動が増加すると大気温度 T が増加するため、一定圧力面における粒子の数密度 n は減少する。また、圧力の減少率 dP/dz が一定であると仮定すると、太陽活動極大期における温度勾配 dT/dz が大きくなるため^{*6}、太陽活動極小期と比較して太陽活動極大期の圧力減少に伴う数密度の減少率 dn/dz が大きくなる。一方で、スケールハイト H_X は1.1.1項で述べたように以下で表される。

$$H_X = \frac{kT}{M_X g}$$

スケールハイト H は温度 T に比例するため、太陽活動極大期には温度が高くなり、スケールハイトは大きくなる。静水圧平衡より、

$$\frac{dn_X}{dz} \propto -\frac{n_X}{H_X}$$

ここで個々の種について考えると、

$$H_O = \frac{kT}{M_O g}, \quad H_{N_2} = \frac{kT}{M_{N_2} g}$$

が成り立つ。酸素原子Oの原子量は16、窒素分子N₂の分子量は28であり、酸素原子Oの方が軽いためスケールハイトが大きくなる ($H_O > H_{N_2}$)。よって、

$$\frac{dn_O}{dz} < \frac{dn_{N_2}}{dz}$$

となり、太陽活動極大期には重い種 (N₂) の数密度が軽い種 (O) よりも上空に行くほど急速に減少する。この種に依存した鉛直密度勾配によって [O]/[N₂] が説明できる。太陽活動極大期には温度上昇により、一定圧力面の高度が上昇する。よって図4.47で表されるように、一定圧力面ではスケールハイトにより [N₂] がより速く減少し、[O] が相対的に増加するため、太陽活動が増加すると一定圧力面での [O]/[N₂] が増加するという現象が見られる (図4.51)。

注意すべきは本研究が高度固定座標での評価である一方で、この仮説が圧力固定座標においてのみ成立する議論である点である。圧力変動については A. G. Burns et al., (2015) [49] で、「太陽活動極大期と太陽活動極小

^{*6} 高度約130 km 以下の大気温度は太陽活動の影響をあまり受けないため (図1.6参照)

期の両方で高度約100 km に相当する $\ln(P_0/P) = -6$ の圧力」と「太陽活動極小期では高度約200 km、太陽活動極大期では高度240 km に相当する圧力 $\ln(P_0/P) = 0$ 」と説明されており、100 km 付近では圧力面は上下せず、200 km 付近では最大40 km 上下するものと思われる。さらに、この仮説は大気温度が変動することが前提であるため、高度100 km 付近の大気温度が変動しない領域 (図1.6) ではこの仮説は成立しない。

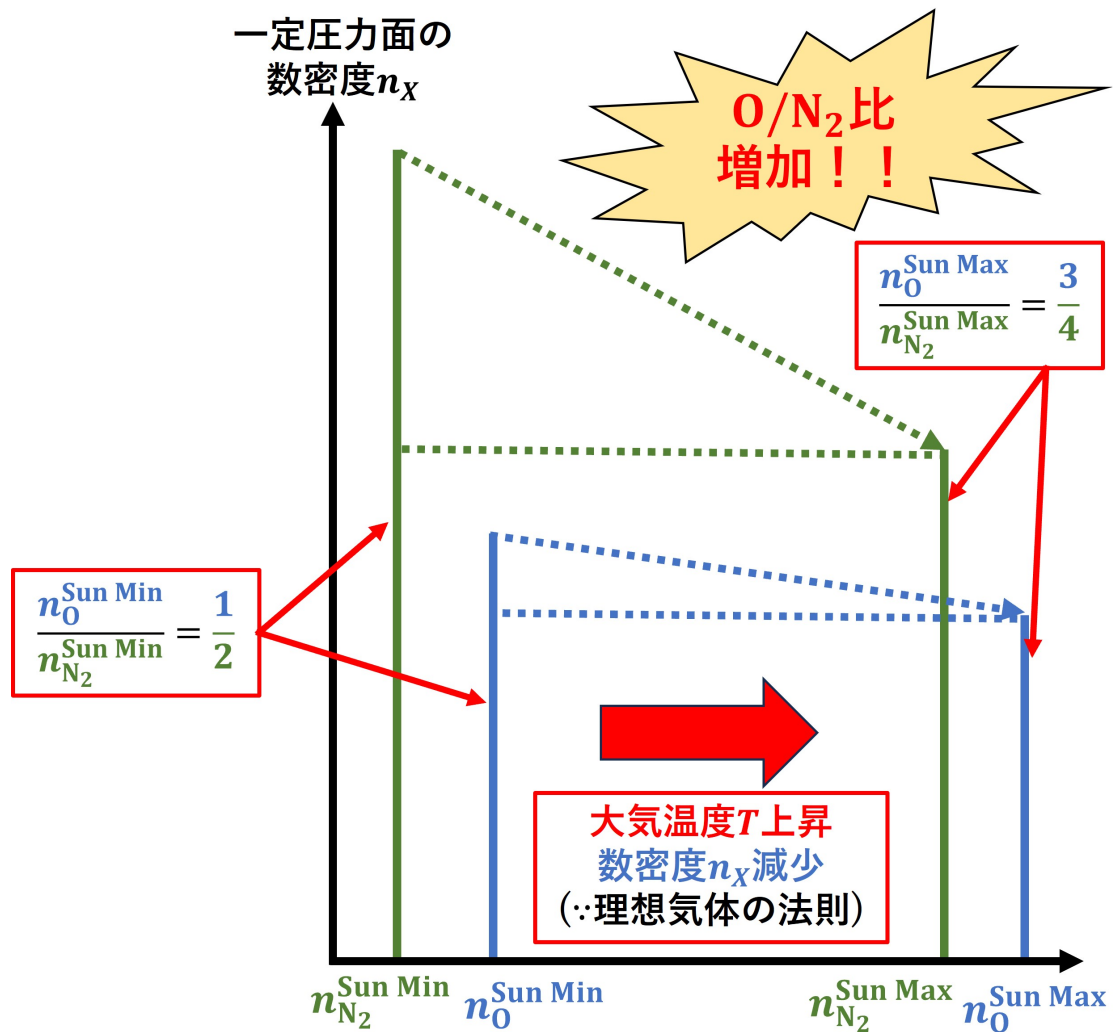


図4.47: 太陽活動極大期と極小期の数密度変動

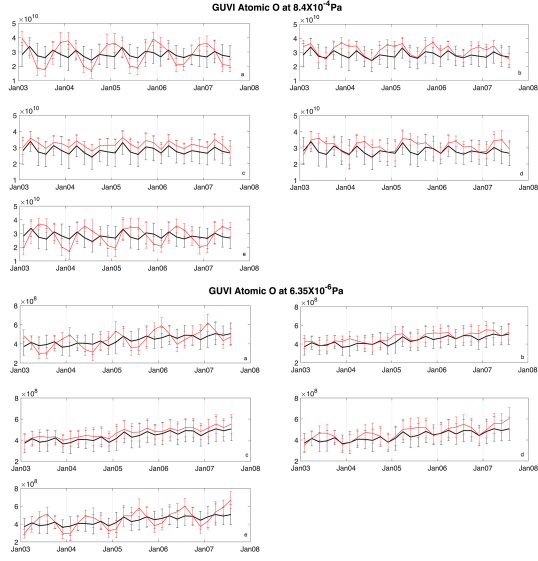


図4.48: GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) の O 数密度の時系列 [46]。赤線は異なる緯度帯 (a~e:

それぞれ 30-60°N、10-30°N、10°S-10°N、30-10°S、60-30°S) を示す。黒線は全球平均

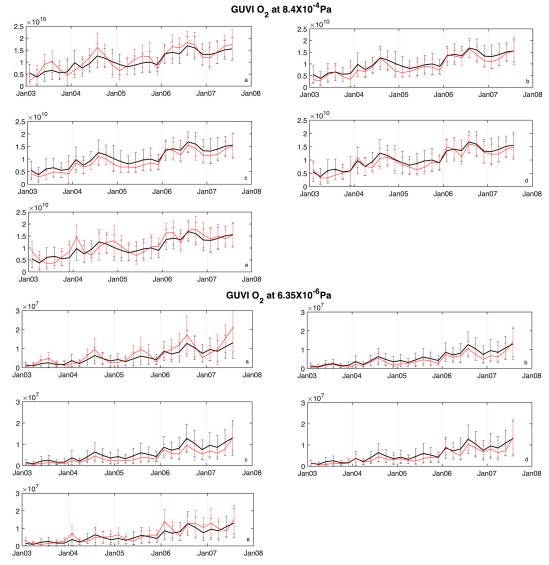


図4.49: GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) の O₂ 数密度の時系列 [46]。図4.47と同様

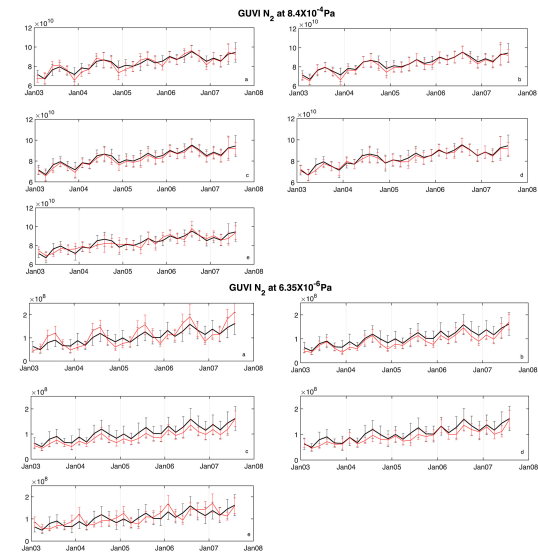


図4.50: GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) の N₂ 数密度の時系列 [46]。図4.47と同様

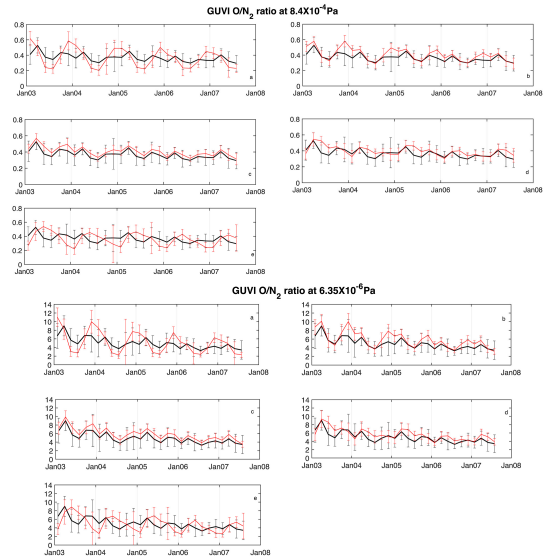


図4.51: GUVI による 2003-2007 年の熱圏下部 (上) と上部 (下) の O/N₂ 数密度比の時系列 [46]。図4.47と同様

4.3 Total Electron Content

[O]/[N₂] は中性大気と電離大気を結びつけるパラメータとして、以前より使用されている (e.g., Lean et al., (2011) [55])。特に大気の電子柱密度 Total Electron Content; TEC と季節変動の一致や、磁気嵐の際には両方のパラメータが低下するといった、正の相関があることが知られている。TEC も太陽活動と正の相関をしているため (e.g., E D Lopez Izurieta et al., (2022) [56])、本節では酸素/窒素 Flux 比と TEC の相関を調査する。

TEC は世界各地の Global Navigation Satellite System; GNSS 基地局で測定されている。これらをまとめた名古屋大学宇宙地球環境研究所 ISEEが配布している Global absolute TEC; ATEC^{*7}を用いる。図4.52に2014/04/16 18:00:00(UTC) の ATEC マップを示す。測定方法の都合上、基地局のない海上のデータは存在しないため注意が必要である。「すざく」観測所ポイントと最も近いポイントの ATEC データの平均値を参照する。図4.53は ATEC の長期変動である。

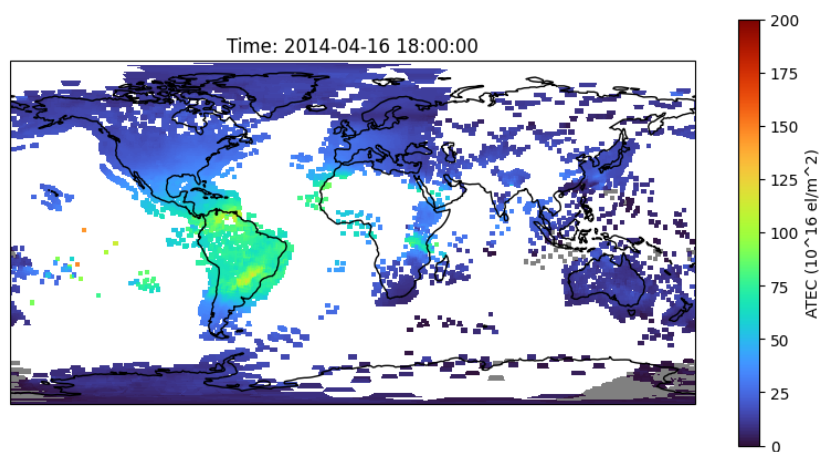


図4.52: 2014/04/16 18:00:00(UTC) の ATEC マップ

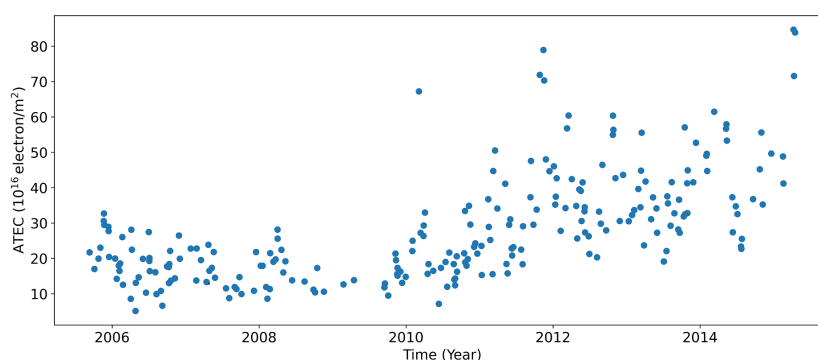
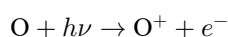


図4.53: ATEC の長期変動

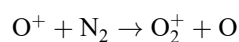
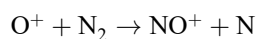
^{*7} 補正されていない観測値そのままの TEC データ

以下に酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関プロットと図4.54に縦軸に高度、横軸に算出した相関係数をプロットした図を示す。全高度で相関係数 $r_{O/N}^{ATEC} \simeq 0.5 - 0.6$ 程度のゆるい正の相関を見せた。これだけでは太陽活動に依存する酸素/窒素 Flux 比と TEC が独立に類似した変動を示しているだけかもしれない。

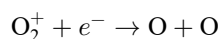
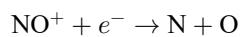
しかし、10 年より短い時間スケール (季節、地磁気活動) において、 $[O]/[N_2]$ と TEC は相関を見せており、これは次のように理解されてきた (e.g., Yosuke Yamazaki, Arthur D. Richmond., (2013) [57]); まず、電子密度のピーク高度は約300 km(F 領域) であり、TEC も主にこの高度の電子密度を反映している。F 領域電離層の高度では、中性組成は主に原子状酸素 O、分子状酸素 O_2 、分子状窒素 N_2 からなる。F 領域の高度のプラズマ集団は O^+ が支配的であり、その主な原因はO の光電離である。



原子状酸素は O^+ の生成につながる。一方、 O^+ の損失は主にイオン交換反応によって起こる。



これらの後、電子との急速な解離性再結合が起こり、 NO^+ と O_2^+ は即座に破壊され、それぞれ以下の中性種を生成する。



したがって、分子種 (N_2 および O_2) は電離層プラズマ密度を低下させるように作用する。光化学平衡が存在する場合、電子密度は密度比 $[O]/[N_2]$ にほぼ比例する。これは、F 領域電離層プラズマに対する熱圏組成の影響の尺度としてよく使用される。

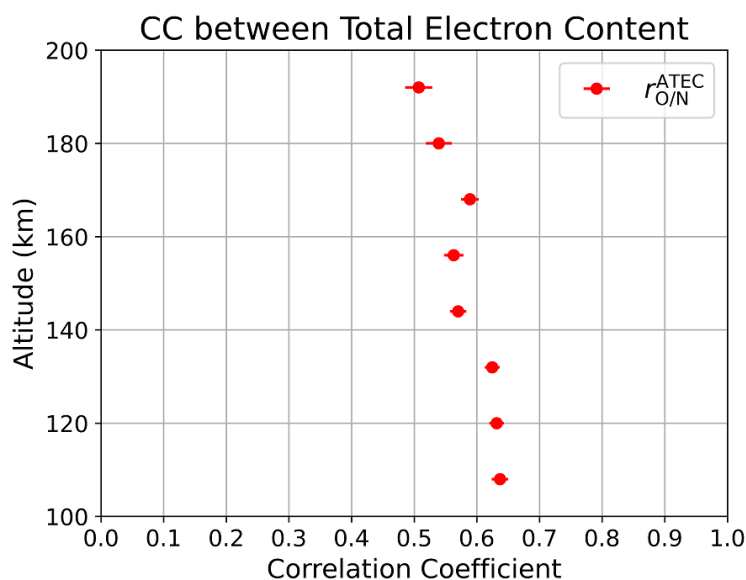


図4.54: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関係数

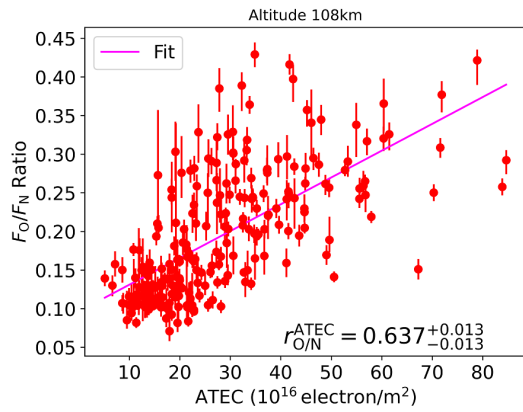


図4.55: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度108 km

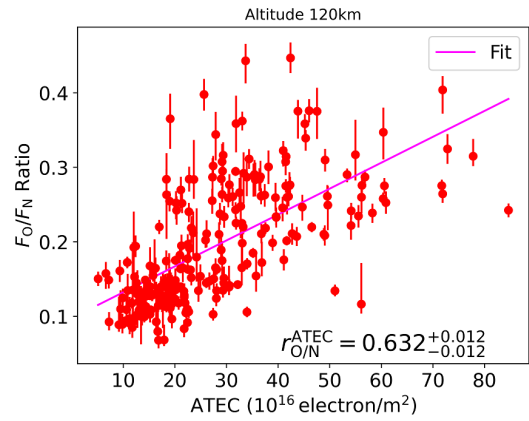


図4.56: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度120 km

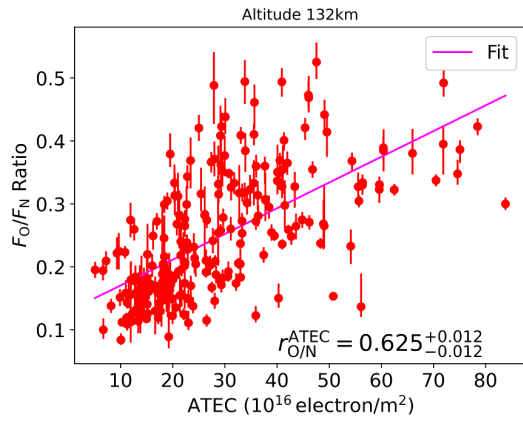


図4.57: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度132 km

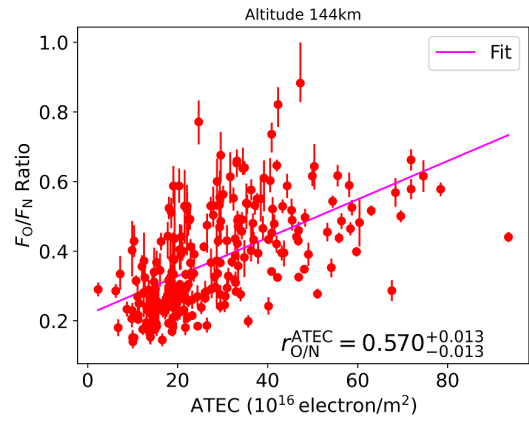


図4.58: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度144 km

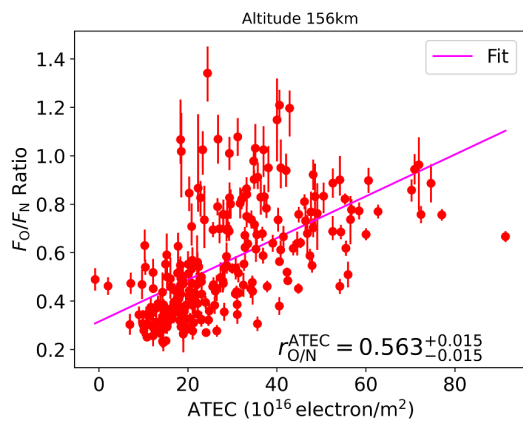


図4.59: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度156 km

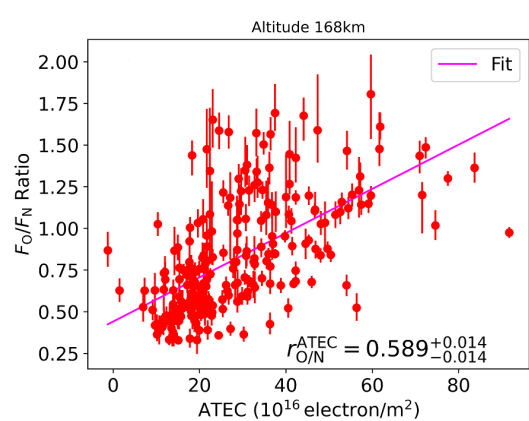


図4.60: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度168 km

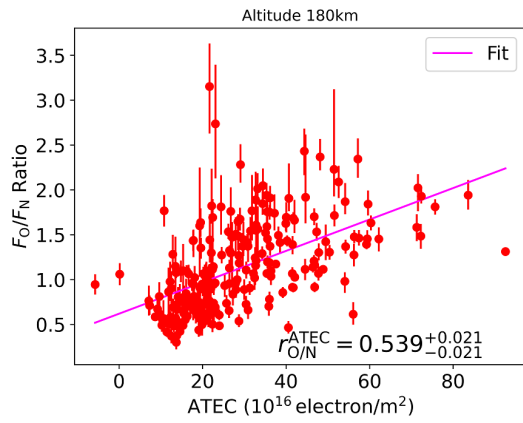


図4.61: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度180 km

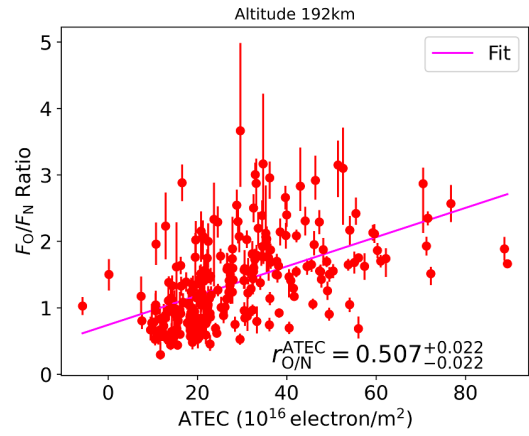


図4.62: 酸素/窒素 Flux 比と ATEC の相関:
高度192 km

このように、 $[O]/[N_2]$ と太陽活動ならびに電子密度の相関は複数の先行研究で調査されてきた。本研究の酸素/窒素 Flux 比とこれらパラメータの相関は先行研究と consistent であり、4.2.2項で触れたような X 線観測における系統誤差を考慮しても、熱圏大気におけるリアルな物理現象を捉えることができたと結論付けられる。

第 5 章

まとめ

本研究では、X 線天文衛星「すざく」を用いた地球超高層大気の長期変動の観測、及び太陽活動との相関について調べた。地表から約 550 km という地球低軌道を周回する「すざく」はその天体観測過程において、太陽に照らされた昼の地球を指向する時間が存在するため、天体観測ばかりでなく地球大気からの蛍光 X 線放射を捉えることで地球観測も行っている。加えて「すざく」は 2005 年 9 月から 2015 年 6 月の約 10 年間稼働したため、約 10 年分の地球大気観測データが存在する。これは太陽活動の 11 年周期を広くカバーしているため、太陽活動と地球大気の間関係を調査することが可能である。さらに衛星の姿勢や観測時刻情報等から、衛星が観測している領域の地表からの高度を指定し、イベントを切り出すことができ、X 線であれば紫外線観測の限界高度約 140 km よりも低高度まで観測が可能であるため、特に観測の難しい高度 100–200 km の「ignosphere」領域を調査できる。具体的には 96–120 km、108–132 km、120–144 km、…、180–204 km のように高度 100–200 km の領域を 8 区間に分けてイベントを抽出した。昼地球大気の $\approx 0.3\text{--}0.6\text{ keV}$ のエネルギースペクトルには窒素・酸素蛍光 X 線輝線が明瞭に表れているため、2 つの輝線をガウシアン関数でフィッティングを行い得た Flux から、酸素/窒素 Flux 比を算出することができる。約 10 年分の昼地球観測データについてこれら 2 つの解析を行うことで、太陽活動が酸素/窒素 Flux 比に与える影響を高度毎に見ることができる。

その結果、「すざく」観測の酸素および窒素 Flux、さらに酸素/窒素 Flux 比と GOES 衛星観測の太陽 X 線 Flux の間には正の相関があった。この相関は今回解析した 8 つすべての高度領域で見え、Pearson の積率相関係数は $r_O \approx r_N \approx 0.9$ 、 $r_{O/N} \approx 0.7$ と算出された。Flux に関しては太陽からの電磁放射が強くなることで、多くの光電吸収反応が起こることを示している。Flux 比と太陽 x 線 Flux の相関は、太陽活動が活発になると超高層大気の相対的に酸素比率が増加することを示唆し、紫外線観測の先行研究とも consistent な結果である。この相関の起源は複数の仮説が提唱されているが、本研究では特定には至らなかった。太陽活動のほか、大気の電子柱密度 Total Electron Content と酸素/窒素 Flux 比にも $r_{O/N}^{\text{ATEC}} \approx 0.5 - 0.6$ 程度のゆるい正の相関が見られ、これは光解離と再結合反応により説明される。

今回の結果は、太陽活動の 11 年周期が超高層大気中の酸素/窒素比をコントロールすることを示唆し、LEO X 線天文衛星による超高層大気の新たな観測方法の確立に繋がる成果であると言える。しかし、今回扱ったパラメータは Flux の比であり数密度比ではないため、Flux 比の絶対値には不定性が残る。また、観測地域が観測データ毎で散逸しているため、酸素/窒素比の地域依存性についても不安が残る。今後は、これらの不定性を低減し、X 線観測により新たに可能となった熱圏下部領域（高度約 100 km）における物理過程の詳細な検証を行うことで、本研究の知見をさらに発展させたい。

付録 A

解析に用いたすざく観測データ

表A.1に今回の研究で用いた計 239 個のすざく観測データの OBS ID ならびに昼地球観測開始時刻 (UTC) と観測終了時刻 (UTC)、周回数、最大・最小・平均観測緯度 (°) ならびに最大・最小・平均平均観測ローカルタイム (hour) を示す。

表A.1: 解析に用いた観測データ

OBS ID	観測開始時 (UTC)	観測終了時刻 (UTC)	周回数	平均ローカルタイム (最小-最大) (hour)	平均緯度 (最小-最大) (°)
100019030	2005/09/10 14:54:42	2005/09/11 22:54:21	21	8.84 (8.61to9.08)	16.91 (14.63to19.09)
100038010	2005/10/03 11:34:01	2005/10/04 09:58:38	15	9.20 (9.05to9.35)	-21.02 (-22.96to-18.92)
100041010	2005/10/24 08:17:13	2005/10/26 11:27:58	33	10.18 (9.90to10.47)	24.19 (21.58to26.53)
100025020	2005/11/03 01:44:49	2005/11/03 19:23:38	12	9.31 (9.03to9.58)	-2.62 (-6.93to2.01)
700005020	2005/11/19 21:05:21	2005/11/20 22:41:40	17	13.15 (12.98to13.31)	4.59 (1.87to7.28)
800004010	2005/11/21 00:19:39	2005/11/22 14:43:10	25	13.65 (13.42to13.86)	14.64 (11.63to17.48)
800003010	2005/11/22 16:17:58	2005/11/23 16:18:02	16	13.43 (13.26to13.61)	18.00 (15.96to19.94)
800012050	2005/12/12 13:03:31	2005/12/13 09:51:44	14	15.43 (15.27to15.59)	-15.43 (-17.34to-13.43)
700005030	2005/12/13 11:08:51	2005/12/14 11:09:44	16	11.48 (11.34to11.61)	14.79 (11.91to17.54)
100044010	2005/12/16 03:05:35	2005/12/19 09:24:48	50	10.37 (9.63to11.11)	8.67 (5.71to11.60)
100008030	2006/01/15 09:18:57	2006/01/17 22:04:42	39	11.73 (11.36to12.08)	23.27 (20.35to25.90)
700007020	2006/01/23 12:24:01	2006/01/26 01:10:54	39	11.73 (11.53to11.93)	30.68 (29.07to31.51)
100044030	2006/02/02 21:45:21	2006/02/03 08:58:01	8	9.85 (9.67to10.06)	19.83 (18.60to21.17)
501104010	2006/02/06 18:32:57	2006/02/08 13:46:30	28	10.20 (10.00to10.38)	-1.15 (-6.88to4.97)
500026010	2006/02/10 07:33:33	2006/02/12 01:09:17	27	13.55 (13.15to13.91)	-30.93 (-31.50to-29.97)
500018010	2006/02/20 13:58:15	2006/02/23 10:44:06	44	15.18 (14.83to15.53)	1.47 (-3.47to6.39)
700001030	2006/02/23 23:13:18	2006/02/24 16:49:51	12	10.96 (10.82to11.12)	-23.32 (-24.90to-21.62)
701014010	2006/04/01 22:42:52	2006/04/02 19:30:56	14	8.70 (8.61to8.82)	-7.24 (-9.44to-5.32)
401003010	2006/04/04 15:00:17	2006/04/05 11:48:20	14	13.75 (13.59to13.91)	-30.24 (-30.83to-29.52)
500008010	2006/04/07 13:21:17	2006/04/08 10:09:15	14	13.58 (13.39to13.77)	-26.09 (-27.28to-24.85)
701093010	2006/04/25 19:34:54	2006/04/26 11:35:10	11	13.68 (13.53to13.83)	31.24 (30.91to31.47)
801093010	2006/04/26 13:14:24	2006/04/28 05:14:32	26	15.01 (14.80to15.21)	29.92 (28.19to31.08)
501084010	2006/05/10 14:15:29	2006/05/12 01:27:24	23	8.72 (8.56to8.90)	28.44 (26.58to29.90)
801097010	2006/05/31 20:42:36	2006/06/04 17:27:03	59	12.99 (12.58to13.41)	-8.10 (-14.28to-1.66)
701026010	2006/06/16 20:20:06	2006/06/18 04:19:16	21	9.97 (9.54to10.38)	24.47 (22.53to26.15)
801013010	2006/06/30 18:39:27	2006/07/02 17:02:42	30	11.77 (11.55to11.98)	0.15 (-4.06to4.37)
801046010	2006/07/02 18:35:16	2006/07/03 07:23:47	9	11.12 (10.99to11.26)	0.27 (-1.52to2.00)
801047010	2006/07/03 08:58:39	2006/07/04 21:46:05	24	10.97 (10.77to11.18)	-3.29 (-6.61to0.03)
801048010	2006/07/04 23:21:00	2006/07/06 16:56:05	27	10.74 (10.52to10.97)	-8.64 (-12.04to-5.18)
701094010	2006/08/02 10:13:55	2006/08/05 05:23:55	43	11.17 (10.97to11.36)	26.19 (22.46to28.76)
701005010	2006/08/07 18:01:37	2006/08/08 14:50:02	14	9.25 (9.10to9.42)	26.86 (25.35to28.21)
101012010	2006/08/29 19:27:40	2006/09/02 01:48:15	50	10.87 (10.54to11.19)	-29.85 (-31.26to-27.73)

次ページに続く

前ページからの続き

OBS ID	観測開始時刻 (UTC)	観測終了時刻 (UTC)	周回数	平均ローカルタイム (最小-最大) (hour)	平均緯度 (最小-最大) (°)
401043010	2006/09/07 00:04:33	2006/09/08 01:40:11	17	10.24 (10.06to10.42)	-29.54 (-30.35to-28.56)
501009010	2006/09/29 22:11:59	2006/10/01 06:11:14	21	10.61 (10.42to10.81)	30.43 (29.55to31.09)
501049010	2006/10/08 10:48:20	2006/10/09 01:12:36	10	9.58 (9.43to9.73)	16.55 (15.02to18.03)
501050010	2006/10/09 02:47:35	2006/10/09 12:24:07	7	9.52 (9.39to9.66)	14.91 (13.57to16.18)
501053010	2006/10/10 21:57:06	2006/10/11 09:09:32	8	9.20 (9.06to9.34)	10.27 (8.76to11.72)
500009020	2006/10/15 02:45:07	2006/10/17 18:43:16	41	9.58 (9.33to9.82)	-15.61 (-20.07to-10.74)
501045010	2006/10/19 04:14:26	2006/10/20 10:37:47	20	8.69 (8.50to8.89)	-20.92 (-22.93to-18.81)
401095010	2006/11/08 07:08:45	2006/11/09 02:21:28	13	8.80 (8.66to8.94)	3.39 (0.70to6.08)
801019010	2006/11/28 04:04:47	2006/11/29 21:39:21	27	14.72 (14.49to14.94)	-28.65 (-29.97to-27.06)
801039010	2006/12/02 04:01:04	2006/12/03 07:12:33	18	14.98 (14.81to15.14)	-31.46 (-31.55to-31.20)
701003010	2007/01/25 20:46:39	2007/01/31 01:26:10	79	14.44 (13.68to15.24)	-21.09 (-25.56to-16.07)
501105010	2007/02/23 09:02:32	2007/02/23 18:40:29	7	13.86 (13.62to14.10)	20.36 (18.11to22.50)
701056010	2007/02/24 18:40:29	2007/02/28 23:27:34	64	14.47 (14.32to14.67)	2.13 (-8.86to12.49)
501059010	2007/03/15 20:00:50	2007/03/17 03:59:39	21	15.06 (14.81to15.31)	-23.70 (-25.42to-21.92)
402002010	2007/04/13 12:56:11	2007/04/14 22:31:54	22	12.04 (11.87to12.20)	28.18 (26.26to29.73)
502021010	2007/04/22 14:16:41	2007/04/25 09:26:02	43	10.24 (9.95to10.52)	10.01 (4.75to15.17)
702125010	2007/04/27 14:16:59	2007/04/30 19:01:04	49	11.03 (10.67to11.38)	-18.61 (-22.81to-13.98)
502047010	2007/05/09 03:02:05	2007/05/10 23:51:34	29	14.18 (13.90to14.49)	-11.86 (-17.62to-5.26)
702078010	2007/05/18 18:43:46	2007/05/19 12:19:45	12	11.47 (11.32to11.63)	3.52 (1.46to5.60)
702056010	2007/05/24 20:22:39	2007/05/28 21:53:26	62	13.68 (13.40to13.95)	31.19 (29.93to31.55)
402001010	2007/07/19 00:00:18	2007/07/21 09:33:44	37	10.56 (10.34to10.78)	31.38 (30.70to31.55)
802030010	2007/08/04 03:02:33	2007/08/04 23:51:04	14	12.34 (12.18to12.50)	-23.39 (-25.28to-21.41)
502022010	2007/08/31 04:10:27	2007/09/03 18:30:18	55	12.56 (12.33to12.79)	30.63 (28.48to31.55)
402015010	2007/09/09 16:44:23	2007/09/13 19:50:37	63	12.03 (11.69to12.77)	21.87 (16.72to26.53)
802046010	2007/09/24 13:06:19	2007/09/27 13:02:29	46	9.02 (8.66to9.38)	-11.64 (-16.24to-6.79)
502052010	2007/10/04 00:06:59	2007/10/07 01:39:19	47	8.98 (8.72to9.25)	-31.40 (-31.55to-30.85)
902002010	2007/12/05 05:26:48	2007/12/06 02:14:32	14	10.32 (10.16to10.49)	9.57 (7.44to11.71)
702040010	2007/12/15 21:28:54	2007/12/17 23:03:39	32	14.33 (14.16to14.50)	12.55 (7.90to17.41)
802060010	2008/01/08 17:53:20	2008/01/13 00:13:48	65	15.24 (15.04to15.46)	-3.49 (-12.54to5.94)
502069010	2008/01/17 19:09:10	2008/01/19 17:30:01	30	12.38 (11.96to12.80)	5.74 (3.08to8.31)
702074010	2008/02/05 04:17:21	2008/02/07 01:04:07	29	11.46 (11.30to11.63)	25.21 (22.21to27.73)
502075010	2008/02/11 15:24:31	2008/02/14 15:20:11	45	11.66 (11.35to11.94)	-1.12 (-6.84to3.49)
802045020	2008/02/23 10:17:37	2008/02/25 13:28:06	33	10.51 (10.31to10.71)	-29.86 (-31.17to-27.78)
502046010	2008/02/25 05:42:33	2008/03/01 19:55:35	85	14.03 (13.19to14.94)	-17.51 (-22.62to-11.84)
502051010	2008/03/10 21:21:48	2008/03/15 05:15:17	66	13.09 (12.73to13.44)	27.09 (22.87to30.22)
102015010	2008/03/21 22:42:09	2008/03/23 09:54:37	23	13.49 (13.24to13.76)	23.96 (20.37to26.90)
503078010	2008/03/31 06:31:51	2008/04/01 16:08:58	22	13.35 (13.11to13.60)	-11.42 (-16.18to-6.40)
503079010	2008/04/01 08:07:16	2008/04/02 14:32:23	20	13.45 (13.20to13.71)	-16.09 (-20.14to-11.71)
703001010	2008/04/20 03:02:20	2008/04/22 12:35:51	37	14.83 (14.58to15.07)	6.56 (1.69to11.32)
503082010	2008/04/29 10:47:52	2008/05/02 07:31:45	44	13.89 (13.62to14.16)	29.30 (27.11to30.89)
503055010	2008/05/09 13:46:58	2008/05/10 16:57:48	18	14.43 (14.20to14.67)	20.47 (18.67to22.26)
503094010	2008/06/12 03:31:25	2008/06/15 17:47:54	55	14.12 (13.38to14.85)	18.14 (14.89to21.24)
103004010	2008/08/13 05:26:36	2008/08/14 13:24:51	21	15.59 (15.33to15.78)	20.99 (19.20to22.76)
703048010	2008/09/27 02:44:47	2008/10/02 15:24:08	84	13.26 (12.91to13.57)	31.12 (29.75to31.55)
403075010	2008/10/05 02:21:45	2008/10/07 15:06:50	39	10.37 (10.04to10.73)	31.41 (30.81to31.55)
503028010	2008/10/15 13:16:06	2008/10/17 10:02:17	29	9.56 (9.35to9.76)	14.20 (10.42to17.75)
503054010	2008/11/18 03:04:01	2008/11/20 15:48:07	39	11.05 (10.72to11.36)	29.19 (27.29to30.66)
503076010	2009/02/24 09:00:29	2009/02/26 00:58:46	26	13.88 (13.69to14.06)	30.69 (29.60to31.38)
404081010	2009/04/15 10:58:36	2009/04/18 15:41:31	49	12.61 (12.37to12.85)	31.18 (30.05to31.55)
504091010	2009/09/14 20:03:41	2009/09/16 07:13:47	23	11.69 (11.49to11.90)	29.45 (28.21to30.45)
504093010	2009/09/17 05:35:07	2009/09/19 02:20:24	29	11.48 (11.25to11.73)	25.53 (23.26to27.53)

次ページに続く

前ページからの続き

OBS ID	観測開始時刻 (UTC)	観測終了時刻 (UTC)	周回数	平均ローカルタイム (最小-最大) (hour)	平均緯度 (最小-最大) (°)
504104010	2009/10/03 01:50:58	2009/10/05 06:35:34	34	8.70 (8.41to9.00)	-14.18 (-17.62to-10.57)
504086010	2009/11/08 17:21:22	2009/11/10 18:54:07	32	14.88 (14.58to15.16)	-14.39 (-17.60to-11.00)
504087010	2009/11/11 10:51:19	2009/11/13 09:12:18	30	14.34 (14.06to14.60)	-19.86 (-22.51to-17.00)
504005010	2009/11/17 16:43:48	2009/11/18 21:33:54	19	9.55 (9.19to9.87)	-3.55 (-9.26to3.38)
504006010	2009/11/19 00:43:33	2009/11/19 10:21:27	7	9.69 (9.46to9.92)	-8.83 (-11.93to-5.79)
504007010	2009/11/19 05:31:26	2009/11/20 02:20:51	14	9.74 (9.48to9.98)	-11.22 (-15.06to-6.93)
704032010	2009/12/02 16:24:50	2009/12/05 21:09:32	49	10.45 (10.29to10.62)	-22.42 (-27.35to-16.37)
404070010	2009/12/11 09:50:38	2009/12/14 11:20:51	47	10.40 (9.97to10.83)	12.10 (7.70to16.31)
804039010	2009/12/29 04:42:46	2010/01/04 14:00:03	97	11.48 (9.86to12.93)	0.72 (-2.14to4.16)
104019010	2010/02/01 08:27:33	2010/02/02 05:14:36	14	9.68 (9.46to9.91)	12.95 (11.22to14.68)
404008010	2010/02/02 08:27:46	2010/02/04 13:11:51	34	9.97 (9.70to10.27)	20.52 (17.82to23.39)
504081010	2010/03/03 19:01:30	2010/03/04 23:48:07	19	12.52 (12.28to12.78)	-30.20 (-30.92to-29.29)
404020010	2010/03/11 15:47:51	2010/03/12 22:11:09	20	14.94 (14.79to15.09)	13.32 (9.94to16.50)
104022030	2010/03/26 04:03:22	2010/03/27 10:26:06	20	12.89 (12.69to13.07)	31.26 (30.70to31.54)
904006010	2010/03/27 10:27:14	2010/03/28 13:37:59	18	13.49 (13.32to13.66)	28.86 (27.63to29.92)
505005010	2010/04/02 22:58:52	2010/04/03 22:57:33	16	12.22 (12.08to12.38)	20.07 (18.08to22.25)
505025010	2010/04/16 06:42:04	2010/04/17 16:16:31	22	12.97 (12.79to13.14)	-30.54 (-31.25to-29.48)
505016010	2010/04/20 19:23:17	2010/04/21 06:35:41	8	13.53 (13.37to13.68)	-29.56 (-30.22to-28.80)
505021010	2010/05/13 20:25:52	2010/05/14 10:49:42	10	14.80 (14.60to15.01)	27.79 (26.85to28.70)
105003010	2010/06/11 09:51:30	2010/06/13 01:48:18	26	12.03 (11.73to12.34)	-29.59 (-30.38to-28.37)
805090010	2010/06/21 12:48:34	2010/06/23 06:22:51	27	12.51 (12.34to12.67)	8.31 (4.05to12.80)
805040010	2010/07/14 00:50:42	2010/07/15 08:49:51	21	11.09 (10.94to11.24)	14.07 (10.54to17.40)
805078010	2010/07/22 00:42:13	2010/07/24 13:25:38	39	11.68 (11.42to11.94)	-24.38 (-27.16to-21.16)
505061010	2010/08/02 08:28:25	2010/08/05 02:01:23	42	13.81 (13.64to13.97)	-9.96 (-16.08to-3.29)
405051010	2010/08/24 14:08:08	2010/08/27 14:01:52	46	12.23 (11.85to12.61)	27.07 (24.35to29.35)
805057010	2010/08/27 05:55:29	2010/08/28 15:29:42	22	10.33 (10.16to10.52)	30.17 (28.99to31.01)
705047040	2010/08/30 21:42:27	2010/08/31 23:17:08	17	8.72 (8.57to8.93)	30.04 (29.18to30.76)
805056010	2010/09/01 02:33:44	2010/09/02 02:33:20	16	10.25 (10.11to10.40)	21.19 (18.64to23.56)
705040020	2010/09/08 16:53:14	2010/09/10 16:49:31	31	11.71 (11.43to11.97)	-22.55 (-24.99to-19.85)
505049010	2010/09/10 10:14:04	2010/09/12 03:46:33	27	8.82 (8.49to9.15)	-6.65 (-9.34to-4.00)
705055010	2010/10/15 17:16:05	2010/10/18 05:59:37	39	10.62 (10.42to10.83)	28.03 (25.34to30.08)
705042010	2010/10/18 17:31:23	2010/10/20 12:40:06	28	15.24 (15.04to15.37)	-16.83 (-19.25to-12.92)
505026010	2010/10/20 13:49:40	2010/10/22 00:59:40	23	9.36 (9.19to9.54)	24.43 (22.09to26.51)
105008010	2010/10/26 23:13:45	2010/10/28 10:23:11	23	9.02 (8.77to9.27)	3.70 (0.92to6.44)
405036010	2010/11/03 02:18:47	2010/11/05 05:27:31	33	10.41 (10.22to10.59)	-29.75 (-31.06to-27.80)
805008010	2010/11/08 19:56:04	2010/11/10 07:05:53	23	13.74 (13.54to13.93)	-12.44 (-15.38to-9.41)
705008010	2010/11/15 19:34:09	2010/11/18 13:04:39	42	11.22 (10.87to11.57)	-1.87 (-6.55to2.83)
705045010	2010/12/03 16:01:19	2010/12/05 11:11:27	28	14.67 (14.51to14.83)	2.45 (-2.35to7.17)
805015010	2010/12/09 22:01:28	2010/12/12 05:56:54	36	11.46 (11.15to11.77)	2.65 (-1.52to6.78)
705048010	2010/12/19 18:24:04	2010/12/21 07:08:55	24	9.46 (9.13to9.78)	-19.23 (-21.27to-17.13)
705024010	2011/01/10 00:09:09	2011/01/11 12:54:17	24	10.07 (9.82to10.32)	11.60 (8.87to14.29)
705058010	2011/01/11 19:24:59	2011/01/14 12:54:50	42	11.76 (11.32to12.18)	28.43 (26.31to30.17)
405029010	2011/02/13 00:58:35	2011/02/16 00:51:54	46	15.25 (14.85to15.64)	-4.91 (-9.66to-0.05)
505076010	2011/02/16 02:28:00	2011/02/17 00:50:36	15	15.12 (14.93to15.32)	3.03 (0.93to5.11)
505092030	2011/02/23 11:46:35	2011/02/24 18:08:32	20	14.22 (14.03to14.39)	24.01 (22.02to25.82)
505078010	2011/03/04 11:24:11	2011/03/06 04:57:14	27	13.56 (13.37to13.74)	30.71 (29.61to31.40)
505092050	2011/03/07 16:04:15	2011/03/12 06:19:55	70	13.34 (13.17to13.52)	23.20 (15.34to28.80)
705041010	2011/03/16 07:47:27	2011/03/19 07:44:16	46	13.44 (13.24to13.66)	-8.17 (-16.13to0.17)
505091010	2011/03/28 10:37:26	2011/03/29 21:46:37	23	14.17 (13.98to14.36)	-30.25 (-31.02to-29.24)
506012010	2011/05/06 12:21:07	2011/05/07 15:31:04	18	13.08 (12.88to13.27)	-10.06 (-12.46to-7.58)
506008010	2011/05/12 20:03:14	2011/05/13 23:13:05	18	12.08 (11.88to12.26)	-24.52 (-26.10to-22.80)

次ページに続く

前ページからの続き

OBS ID	観測開始時刻 (UTC)	観測終了時刻 (UTC)	周回数	平均ローカルタイム (最小-最大) (hour)	平均緯度 (最小-最大) (°)
806004010	2011/05/18 00:36:44	2011/05/20 02:08:11	32	11.61 (11.42to11.82)	-31.25 (-31.55to-30.50)
806003010	2011/05/25 18:03:24	2011/05/26 22:48:52	19	13.89 (13.65to14.12)	-5.99 (-8.27to-3.62)
506055010	2011/06/01 03:07:02	2011/06/02 23:51:59	29	9.72 (9.56to9.90)	-13.55 (-17.67to-9.14)
506056010	2011/06/07 15:40:45	2011/06/09 06:01:54	25	9.48 (9.29to9.66)	11.82 (8.21to15.29)
806029010	2011/06/09 06:15:45	2011/06/10 20:36:18	25	13.30 (13.11to13.49)	31.50 (31.29to31.55)
806029020	2011/06/10 14:11:52	2011/06/12 09:19:58	28	13.20 (13.00to13.39)	31.25 (30.55to31.55)
806033010	2011/06/16 16:56:20	2011/06/18 07:17:47	25	9.96 (9.68to10.24)	31.46 (31.01to31.55)
806095010	2011/07/24 23:25:43	2011/07/25 20:12:50	14	9.99 (9.85to10.14)	7.20 (4.58to9.78)
706001010	2011/08/01 08:44:48	2011/08/03 16:39:39	36	10.17 (9.97to10.37)	30.43 (28.74to31.41)
506026010	2011/08/03 08:54:34	2011/08/07 10:19:36	62	14.00 (13.58to14.43)	15.64 (9.53to21.18)
706015010	2011/09/09 05:43:18	2011/09/11 05:38:52	31	12.51 (12.33to12.66)	19.17 (15.53to22.46)
806155010	2011/09/12 18:07:28	2011/09/13 08:30:38	10	9.13 (8.96to9.30)	1.81 (0.18to3.48)
706044010	2011/09/24 22:26:10	2011/09/25 03:14:40	4	9.77 (9.62to9.92)	31.13 (30.90to31.32)
506036010	2011/10/10 02:32:00	2011/10/14 02:19:57	61	8.59 (8.22to9.02)	-15.55 (-20.96to-10.00)
906005010	2011/10/25 14:57:26	2011/10/26 16:30:55	17	13.76 (13.57to13.95)	16.31 (14.17to18.34)
806013010	2011/11/13 15:29:48	2011/11/16 07:21:41	41	12.07 (11.78to12.36)	17.77 (13.50to21.69)
906006010	2011/11/17 15:31:50	2011/11/18 23:28:01	21	15.07 (14.84to15.29)	-20.65 (-22.67to-18.51)
806018010	2011/11/25 15:02:30	2011/11/27 08:33:16	27	14.11 (13.92to14.29)	-31.33 (-31.55to-30.77)
506037010	2011/12/13 07:25:52	2011/12/14 04:11:24	14	10.48 (10.24to10.71)	-14.25 (-15.92to-12.54)
506006020	2012/01/04 20:36:32	2012/01/05 18:59:06	15	11.35 (11.19to11.51)	14.90 (11.84to17.77)
506006030	2012/01/11 05:53:17	2012/01/12 04:14:07	14	11.31 (11.19to11.48)	-11.79 (-14.00to-9.36)
706027030	2012/01/13 21:56:25	2012/01/14 18:42:30	14	14.85 (14.63to15.05)	-31.49 (-31.55to-31.27)
706029020	2012/01/18 18:25:06	2012/01/21 08:40:17	40	14.38 (14.17to14.58)	-25.71 (-28.52to-22.26)
106005020	2012/02/07 21:44:06	2012/02/08 21:40:49	16	9.54 (9.31to9.77)	10.41 (8.48to12.36)
406033010	2012/03/01 06:20:28	2012/03/02 19:03:14	24	15.13 (14.94to15.32)	-31.48 (-31.55to-31.17)
506051010	2012/03/08 23:26:29	2012/03/10 02:34:47	18	15.10 (14.91to15.28)	-20.63 (-22.59to-18.60)
406024010	2012/03/16 14:52:12	2012/03/17 08:26:04	12	13.48 (13.31to13.65)	-4.53 (-6.41to-2.69)
107007010	2012/04/02 04:08:36	2012/04/03 07:17:07	18	12.39 (12.20to12.58)	31.20 (30.62to31.52)
407034010	2012/04/24 13:48:19	2012/04/27 13:36:28	46	10.86 (10.65to11.06)	-29.41 (-31.12to-26.80)
707007010	2012/04/29 07:07:50	2012/05/01 11:47:04	34	11.82 (11.61to12.03)	-29.26 (-30.66to-27.39)
707006010	2012/05/08 20:52:11	2012/05/09 17:37:15	14	11.45 (11.27to11.63)	-3.91 (-5.83to-1.92)
807085010	2012/05/16 22:06:11	2012/05/17 17:15:35	13	14.11 (13.95to14.26)	31.51 (31.36to31.55)
707013010	2012/05/20 23:13:21	2012/05/22 21:29:41	30	10.85 (10.66to11.05)	30.84 (29.83to31.47)
807086010	2012/05/25 19:49:43	2012/05/26 16:35:06	14	13.44 (13.29to13.58)	17.97 (15.84to20.02)
807088010	2012/06/04 17:15:50	2012/06/05 21:59:42	19	9.18 (9.01to9.35)	12.88 (10.05to15.57)
807089010	2012/06/05 23:34:12	2012/06/07 02:42:23	18	9.04 (8.87to9.21)	8.98 (6.11to11.75)
807091010	2012/06/07 04:17:04	2012/06/07 15:28:09	8	8.97 (8.84to9.10)	5.86 (4.13to7.55)
107002020	2012/06/25 09:46:49	2012/06/26 03:20:16	12	14.27 (14.00to14.53)	14.34 (12.69to15.90)
807114010	2012/06/28 17:17:06	2012/06/29 02:52:24	7	10.70 (10.58to10.83)	-3.36 (-4.91to-1.75)
507002010	2012/08/06 09:45:30	2012/08/06 22:32:05	9	11.20 (11.05to11.35)	-30.39 (-30.84to-29.84)
507077010	2012/08/16 02:38:13	2012/08/17 16:56:52	25	10.84 (10.69to11.00)	-2.29 (-6.88to2.22)
507079010	2012/08/25 02:09:23	2012/08/27 08:23:30	35	13.32 (13.11to13.52)	30.84 (29.68to31.49)
507068010	2012/09/02 15:47:43	2012/09/04 22:01:09	35	11.42 (11.09to11.77)	22.75 (20.02to25.18)
407092010	2012/09/21 09:29:15	2012/09/22 03:02:35	12	9.38 (9.20to9.57)	-27.61 (-28.54to-26.62)
707019020	2012/10/23 09:00:36	2012/10/24 02:33:39	12	15.25 (15.07to15.34)	-13.05 (-14.68to-11.34)
707019030	2012/10/24 04:07:52	2012/10/26 08:44:14	34	14.85 (14.38to15.32)	-15.50 (-18.02to-12.86)
707019040	2012/10/26 10:18:26	2012/10/28 18:06:04	36	14.15 (13.66to14.63)	-18.68 (-21.19to-16.03)
707004010	2012/11/06 02:59:52	2012/11/07 23:39:00	29	14.02 (13.83to14.21)	-30.11 (-31.07to-28.80)
407014010	2012/11/27 20:09:49	2012/11/29 15:13:14	28	9.87 (9.65to10.10)	15.01 (11.61to18.26)
807100010	2012/12/13 20:41:34	2012/12/14 06:16:37	7	14.11 (13.98to14.23)	-13.08 (-14.59to-11.49)
807003010	2013/01/11 16:31:48	2013/01/12 11:40:31	13	12.58 (12.43to12.73)	18.45 (16.50to20.29)

次ページに続く

前ページからの続き

OBS ID	観測開始時刻 (UTC)	観測終了時刻 (UTC)	周回数	平均ローカルタイム (最小-最大) (hour)	平均緯度 (最小-最大) (°)
807092010	2013/01/28 00:32:52	2013/01/30 16:20:12	41	10.90 (10.74to11.06)	23.43 (18.59to27.34)
507076020	2013/02/08 12:22:10	2013/02/10 12:12:31	31	10.85 (10.68to11.03)	-19.62 (-23.19to-15.49)
707029010	2013/02/28 15:22:26	2013/03/01 13:42:12	15	11.12 (10.96to11.29)	2.83 (0.43to5.24)
707035030	2013/03/08 13:12:15	2013/03/11 08:08:49	43	13.36 (13.14to13.57)	30.74 (29.25to31.51)
507075010	2013/03/11 09:43:16	2013/03/13 20:42:36	38	13.24 (13.07to13.42)	27.60 (24.46to29.93)
407093010	2013/03/14 15:47:38	2013/03/15 09:21:22	12	12.97 (12.77to13.16)	23.64 (21.51to25.57)
107008020	2013/03/26 11:15:57	2013/03/27 03:12:52	11	9.06 (8.81to9.30)	10.38 (8.76to11.92)
507074010	2013/04/03 22:00:34	2013/04/06 04:11:27	35	13.91 (13.58to14.24)	-27.04 (-28.94to-24.88)
808101010	2013/05/01 06:23:11	2013/05/04 07:41:19	47	10.11 (9.86to10.38)	31.38 (30.83to31.53)
808057010	2013/05/10 11:49:27	2013/05/11 22:52:52	23	9.39 (9.10to9.69)	20.59 (18.48to22.56)
708002010	2013/05/27 11:58:26	2013/05/29 10:11:08	30	12.72 (12.49to12.96)	-21.77 (-24.42to-18.81)
708044010	2013/05/30 16:20:40	2013/06/01 20:55:36	34	11.00 (10.76to11.26)	-22.30 (-25.14to-19.11)
408018010	2013/07/03 04:48:00	2013/07/03 20:44:30	11	8.57 (8.46to8.73)	10.68 (9.11to12.27)
708001010	2013/07/16 05:15:59	2013/07/18 00:16:54	28	11.56 (11.32to11.81)	-25.84 (-27.72to-23.72)
508072020	2013/07/19 16:25:36	2013/07/22 09:43:11	42	15.50 (15.03to15.86)	20.12 (16.82to22.66)
808064010	2013/07/23 15:39:30	2013/07/26 07:23:02	41	10.74 (10.44to11.05)	-3.94 (-8.86to1.04)
808044010	2013/08/06 15:54:29	2013/08/07 22:12:07	20	12.74 (12.53to12.93)	27.69 (25.56to29.39)
707046010	2013/08/11 23:23:39	2013/08/15 03:50:46	49	12.92 (12.51to13.32)	6.01 (0.76to10.93)
808007010	2013/08/25 09:07:14	2013/08/26 10:37:05	17	11.82 (11.65to11.99)	-29.05 (-30.00to-27.90)
808028010	2013/09/14 08:40:17	2013/09/16 16:24:56	36	12.81 (12.51to13.11)	25.67 (23.07to27.93)
808029010	2013/09/18 08:11:59	2013/09/19 19:14:51	23	12.34 (12.11to12.57)	30.06 (28.97to30.89)
508018010	2013/09/21 15:45:44	2013/09/24 05:53:00	40	11.20 (10.98to11.43)	31.19 (30.19to31.53)
408024020	2013/10/11 00:43:56	2013/10/12 07:01:07	20	9.39 (9.25to9.55)	-7.96 (-11.50to-4.32)
808030010	2013/10/15 21:20:01	2013/10/17 06:46:55	22	14.71 (14.33to15.09)	-25.50 (-27.10to-23.87)
408015010	2013/10/17 08:01:50	2013/10/18 07:55:46	16	9.00 (8.82to9.18)	-26.04 (-27.36to-24.62)
508021010	2013/10/27 21:13:28	2013/10/28 22:43:19	17	9.12 (8.97to9.28)	-24.25 (-26.05to-22.24)
508022010	2013/10/29 00:17:36	2013/10/30 01:47:32	17	9.06 (8.91to9.23)	-21.44 (-23.58to-19.09)
508001010	2013/10/30 17:42:55	2013/11/01 20:41:31	33	9.19 (9.00to9.39)	-12.49 (-16.85to-7.84)
708043010	2013/11/28 03:39:01	2013/11/30 22:31:03	43	14.88 (14.63to15.12)	-31.27 (-31.53to-30.44)
808045010	2013/12/10 13:20:34	2013/12/13 01:52:57	39	14.51 (14.36to14.67)	0.60 (-6.40to7.70)
908003010	2014/01/31 13:18:44	2014/01/31 19:41:43	5	13.95 (13.79to14.11)	5.08 (3.72to6.38)
508078020	2014/02/03 14:19:27	2014/02/05 12:29:32	30	11.06 (10.85to11.28)	-3.89 (-8.15to0.44)
108005020	2014/02/05 14:02:39	2014/02/06 09:09:05	13	10.59 (10.40to10.79)	-1.76 (-3.64to0.16)
508075010	2014/03/10 02:05:21	2014/03/12 14:32:08	39	15.28 (14.96to15.53)	-23.56 (-26.30to-20.85)
509043010	2014/05/07 23:56:55	2014/05/10 01:15:20	32	13.13 (12.91to13.35)	-2.72 (-7.23to1.83)
509046010	2014/05/10 02:51:17	2014/05/12 08:55:56	35	13.26 (13.04to13.48)	8.37 (3.45to13.12)
709003010	2014/05/12 10:15:24	2014/05/14 00:24:32	25	9.67 (9.23to10.14)	-14.82 (-16.76to-12.78)
509041010	2014/06/09 06:09:39	2014/06/11 01:04:53	28	10.89 (10.55to11.23)	-11.68 (-14.35to-8.90)
509044010	2014/06/11 02:45:00	2014/06/13 05:37:29	33	11.94 (11.68to12.19)	-25.21 (-27.49to-22.59)
809025010	2014/06/26 02:18:08	2014/06/27 11:41:28	22	15.62 (15.39to15.79)	18.95 (16.64to20.97)
809079010	2014/07/03 23:24:21	2014/07/06 18:11:01	43	14.66 (14.40to14.89)	31.17 (29.88to31.53)
809002010	2014/07/21 18:45:31	2014/07/23 05:43:59	23	10.69 (10.44to10.95)	17.13 (14.62to19.63)
809003010	2014/07/23 07:18:06	2014/07/24 16:41:14	22	10.37 (10.12to10.62)	13.78 (11.27to16.18)
809005010	2014/07/26 06:47:54	2014/07/27 16:11:00	22	9.69 (9.44to9.95)	7.08 (4.45to9.65)
509023010	2014/09/20 07:37:45	2014/09/21 04:18:00	14	11.55 (11.34to11.74)	-29.78 (-30.47to-28.94)
109008020	2014/10/23 17:58:49	2014/10/24 19:24:30	17	10.50 (10.30to10.71)	27.53 (26.22to28.69)
809120010	2014/11/01 05:36:43	2014/11/03 08:25:43	33	13.88 (13.53to14.22)	-27.76 (-29.40to-25.85)
509051010	2014/11/07 21:42:12	2014/11/08 07:14:54	7	8.84 (8.69to9.00)	-15.49 (-16.77to-14.23)
509062010	2014/12/20 00:10:34	2014/12/20 11:17:57	8	14.76 (14.60to14.90)	-29.64 (-30.18to-29.02)
509076010	2015/02/16 23:51:25	2015/02/18 21:53:04	30	10.46 (10.23to10.69)	-31.43 (-31.53to-31.02)
809054010	2015/02/19 12:09:00	2015/02/20 04:02:04	11	10.48 (10.29to10.68)	-31.02 (-31.34to-30.58)

次ページに続く

前ページからの続き

OBS ID	観測開始時刻 (UTC)	観測終了時刻 (UTC)	周回数	平均ローカルタイム (最小-最大) (hour)	平均緯度 (最小-最大) (°)
408014010	2015/04/08 20:11:26	2015/04/10 16:36:32	29	13.08 (12.82to13.35)	-19.81 (-22.52to-16.97)
509001010	2015/04/10 18:11:36	2015/04/13 16:01:08	45	13.12 (12.94to13.31)	-10.27 (-16.68to-3.26)
509001030	2015/04/16 16:58:39	2015/04/19 14:48:29	45	13.05 (12.89to13.22)	14.76 (7.57to21.16)

付録 B

Event threshold を下げた FI-CCD スペクトル

表B.1に3.4.1項で用いた Event threshold を下げた OBS sequence を示す。これは表B.2の構文によりサーチができる。

表B.1: 解析に用いた観測データ

OBS ID	観測開始時刻 (UTC)	天体名	Config parameters
100038010	2005/10/03	NORTH POLAR SPUR	c
100044010	2005/12/16	E0102-72	c, v
700007020	2006/01/23	MCG-6-30-15	c
100044030	2006/02/02	E0102-72	c
501104010	2006/02/06	MBM12	c
500026010	2006/02/10	North Ecliptic Pole	d
102015010	2008/03/22	RXJ1856.5-3754	c
104022030	2010/03/26	RXJ1856.5	q, c
105008010	2010/10/27	RXJ1856.5-3754	q, c
506026010	2011/08/03	MBM12	q, c
107007010	2012/04/02	RXJ1856.5-3754	q, c
407034010	2012/04/24	U GEM IN QUIECSECNCE	q, m ,c
107002020	2012/06/25	E0102-72	q, c
107008020	2013/03/26	N132D	q, c
109008020	2014/10/23	RXJ1856.5-3754	c

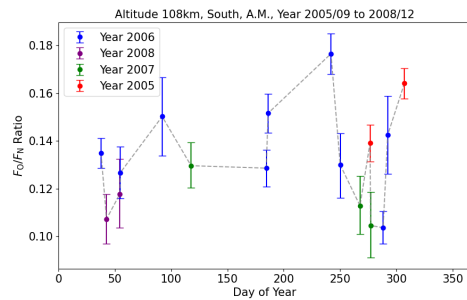
表B.2: Event threshold を下げた OBS sequence を探査する構文

```
SELECT configuration_of_discriminator, observation_id, xis_active_unit, xis_edit_mode, observation_start_time
      FROM suzaku_xis_observation_log
     WHERE (configuration_of_discriminator='c'
            OR configuration_of_discriminator='d'
            OR configuration_of_discriminator='g'
            OR configuration_of_discriminator='h'
            OR configuration_of_discriminator='v'
            OR configuration_of_discriminator='m'
            OR configuration_of_discriminator='q'
            OR configuration_of_discriminator='u')
     ORDER BY observation_id, xis_active_unit, xis_edit_mode, observation_start_time
            LIMIT 10000
```

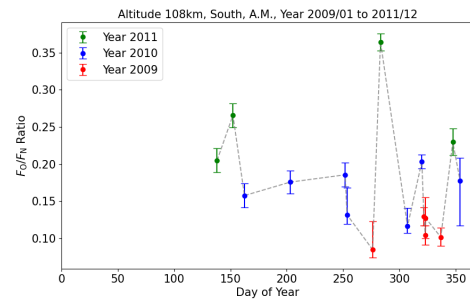

付録 C

酸素/窒素 Flux 比の季節依存性

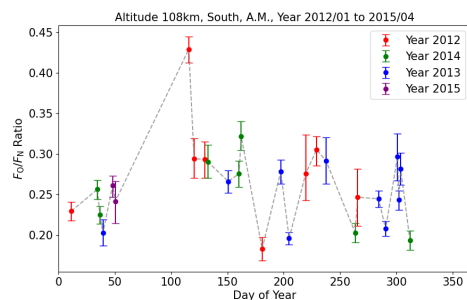
以下に「すざく」観測の酸素/窒素 Flux 比の季節依存性を示す。ただし、その他の影響；長期変動、ローカルタイム依存性 (午前 or 午後)、緯度依存性 (南半球 or 北半球) を排除するためにソートしプロットしている。



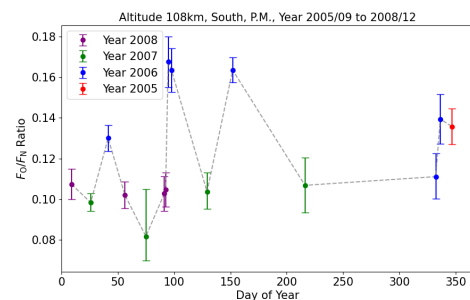
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度108 km



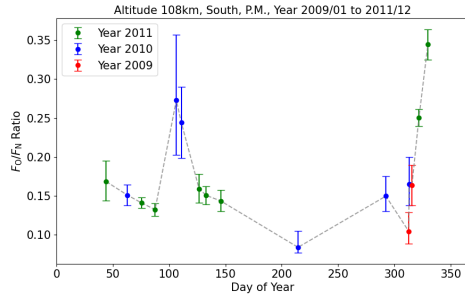
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度108 km



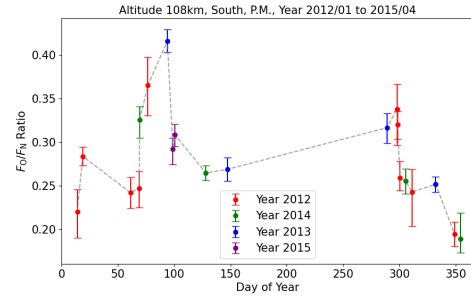
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度108 km



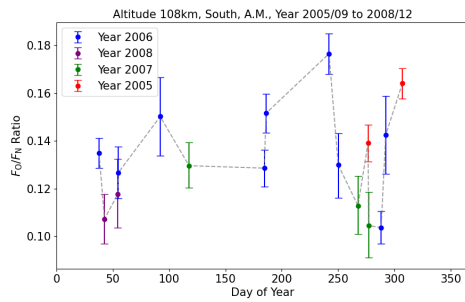
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度108 km



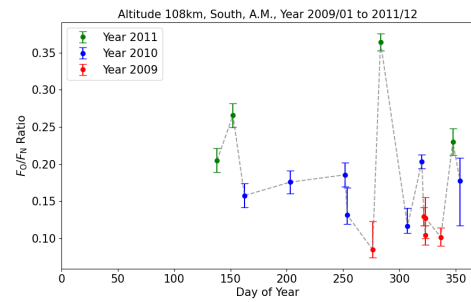
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度108 km



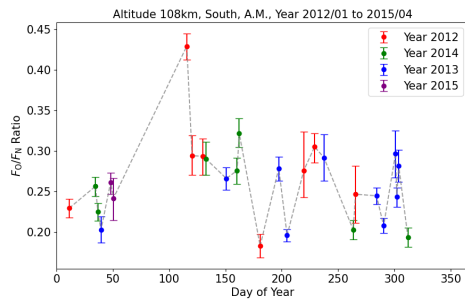
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度108 km



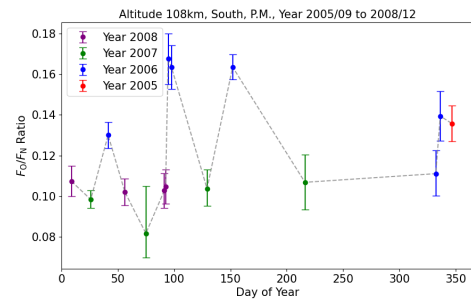
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度108 km



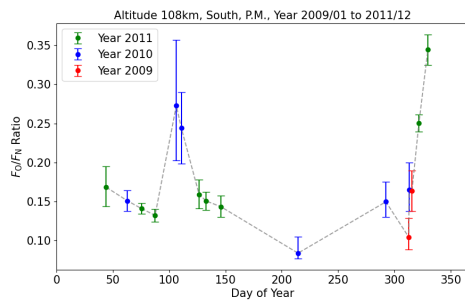
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度108 km



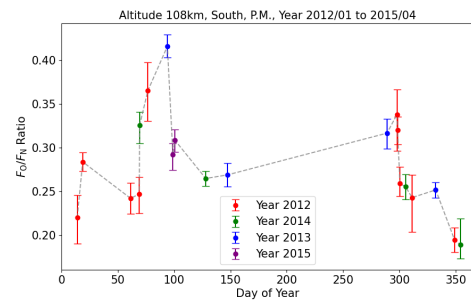
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度108 km



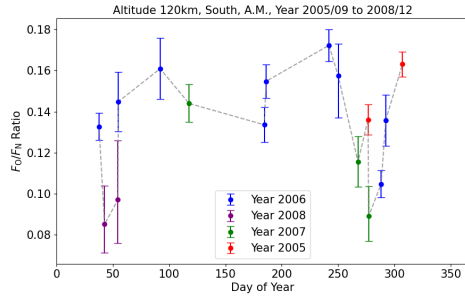
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度108 km



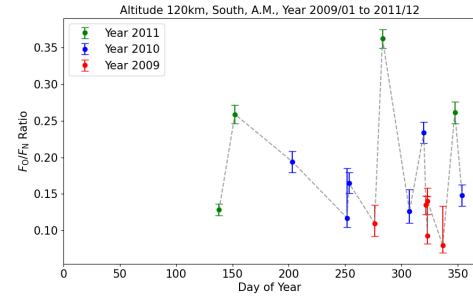
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度108 km



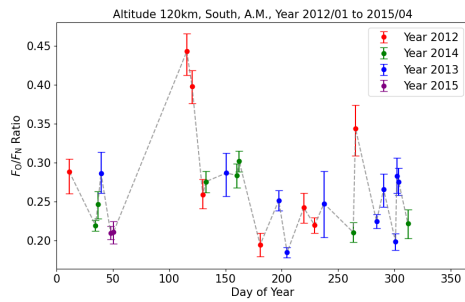
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度108 km



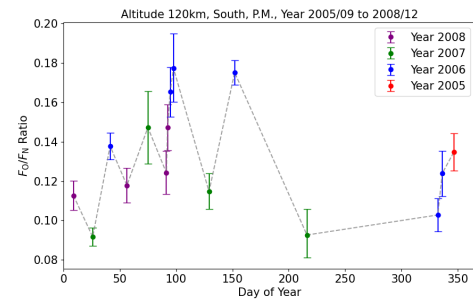
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度120 km



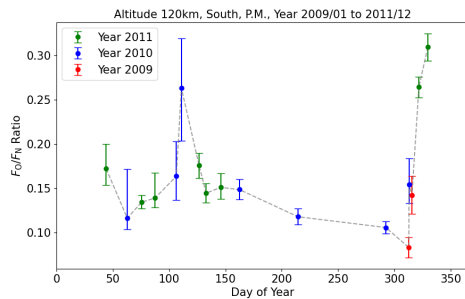
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度120 km



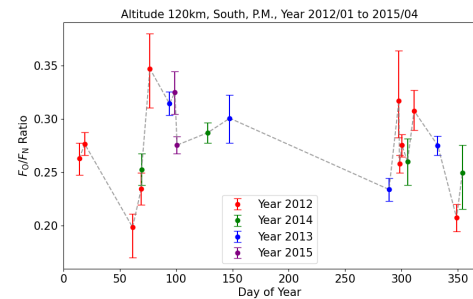
2012 — 2015 年、午前、南半球: 高度120 km



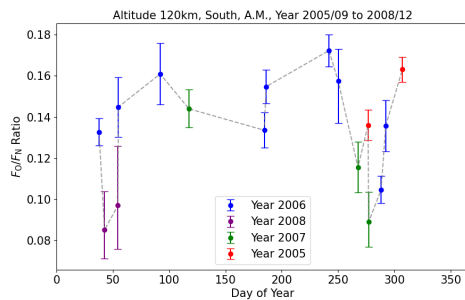
2005 — 2008 年、午後、南半球: 高度120 km



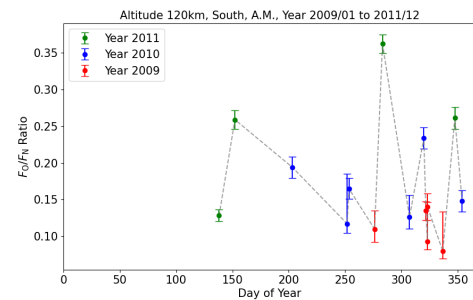
2009 — 2011 年、午後、南半球: 高度120 km



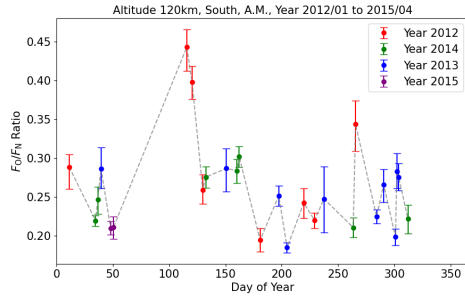
2012 — 2015 年、午後、南半球: 高度120 km



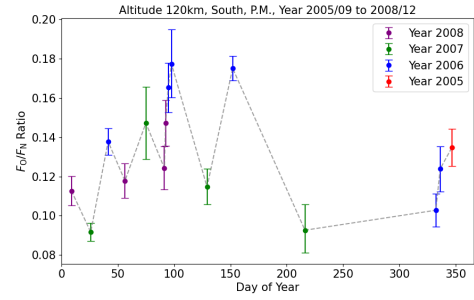
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度120 km



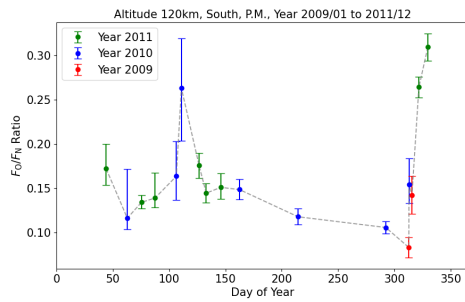
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度120 km



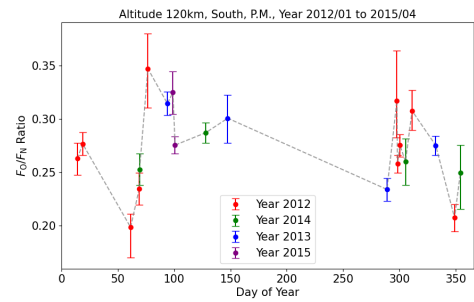
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度120 km



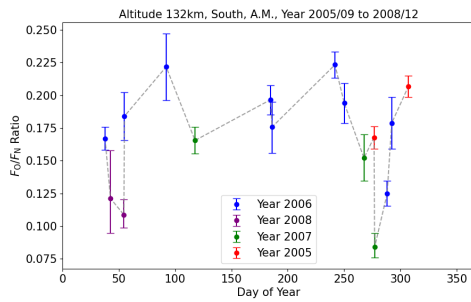
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度120 km



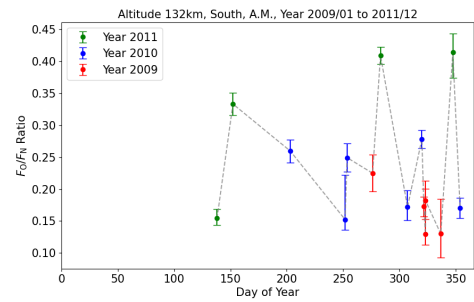
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度120 km



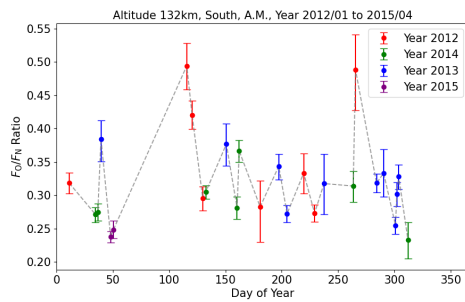
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度120 km



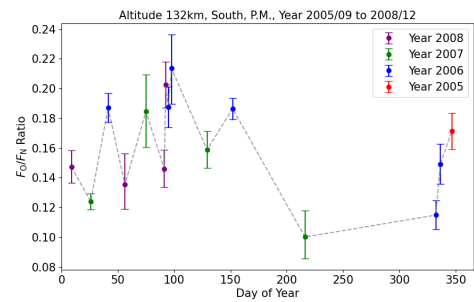
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度132 km



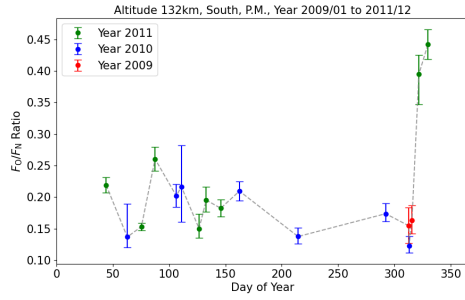
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度132 km



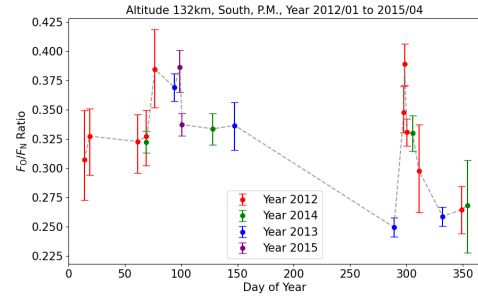
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度132 km



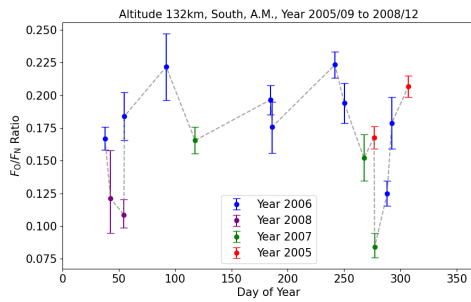
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度132 km



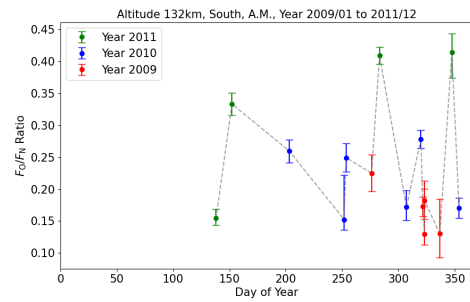
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度132 km



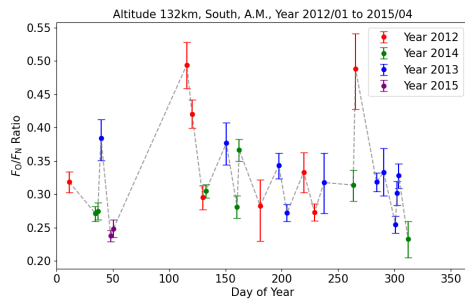
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度132 km



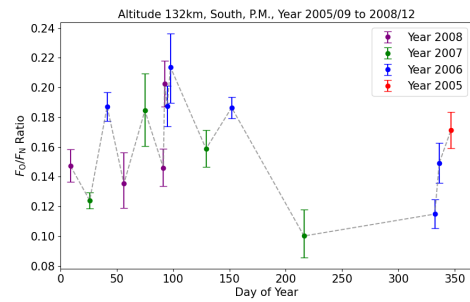
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度132 km



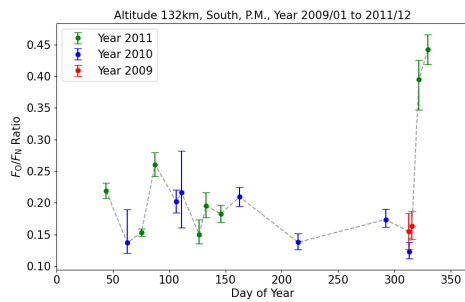
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度132 km



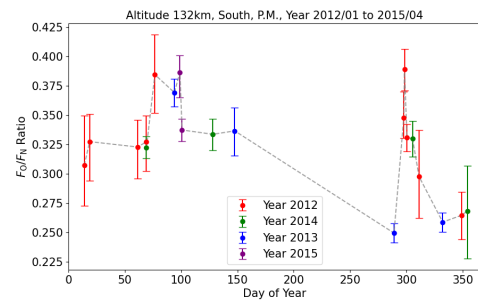
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度132 km



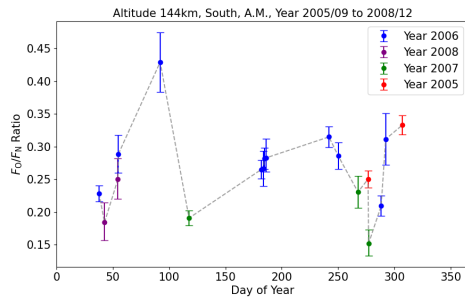
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度132 km



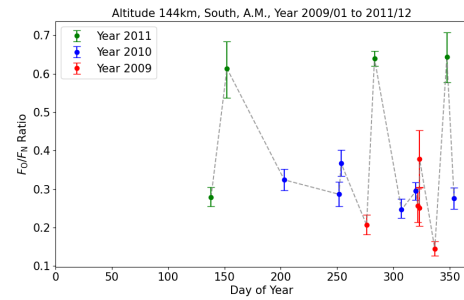
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度132 km



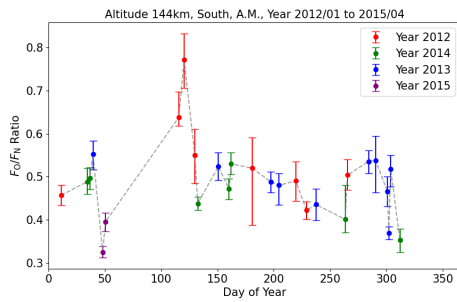
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度132 km



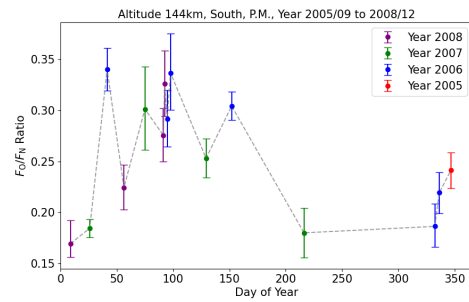
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度144 km



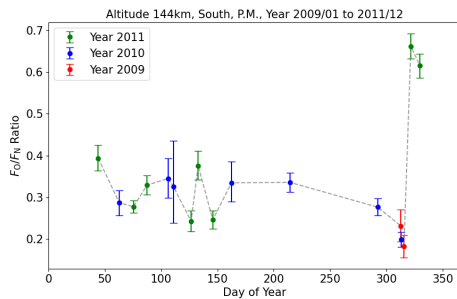
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度144 km



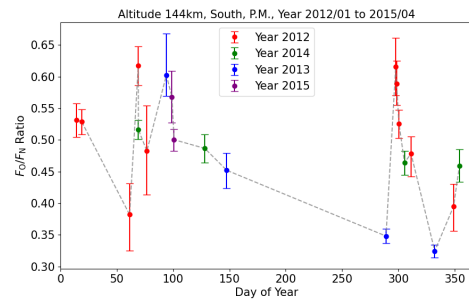
2012 — 2015 年、午前、南半球: 高度144 km



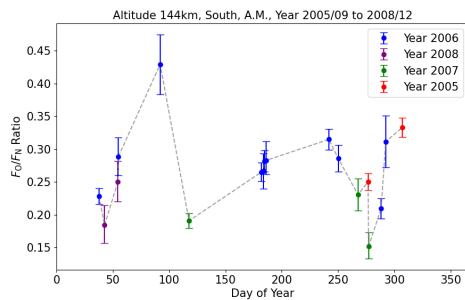
2005 — 2008 年、午後、南半球: 高度144 km



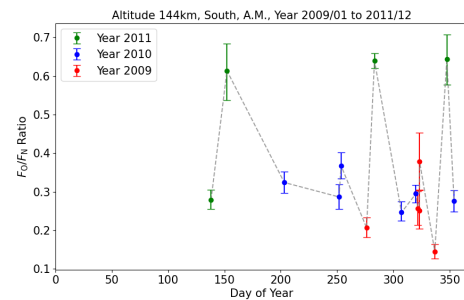
2009 — 2011 年、午後、南半球: 高度144 km



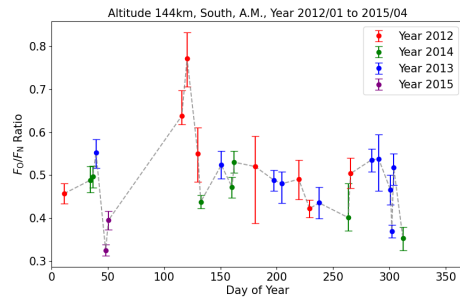
2012 — 2015 年、午後、南半球: 高度144 km



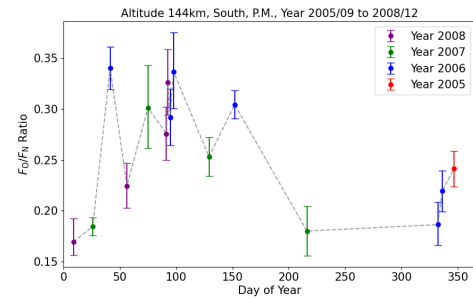
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度144 km



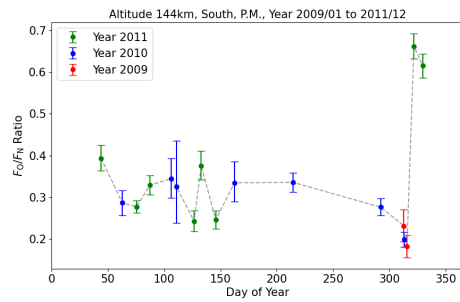
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度144 km



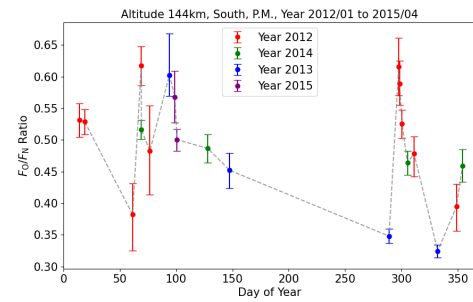
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度144 km



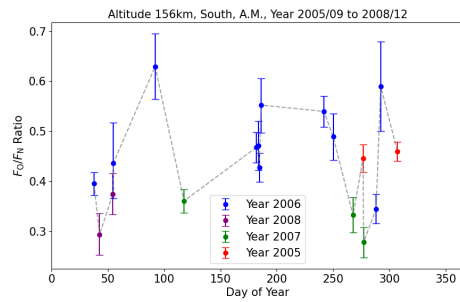
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度144 km



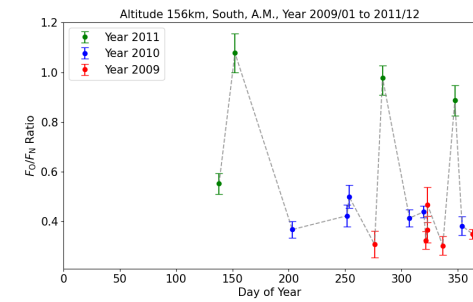
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度144 km



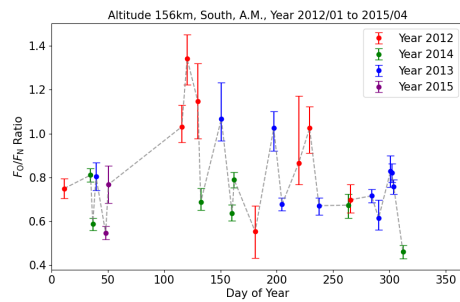
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度144 km



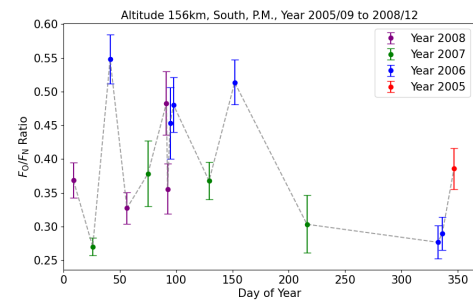
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度156 km



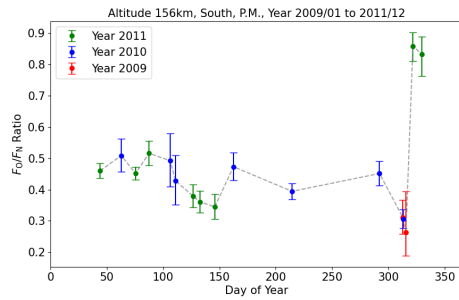
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度156 km



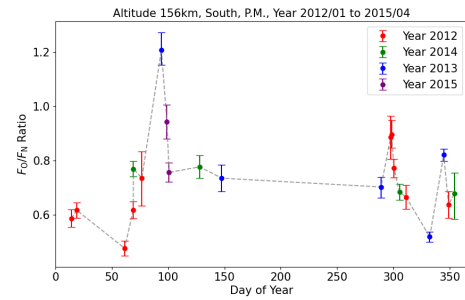
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度156 km



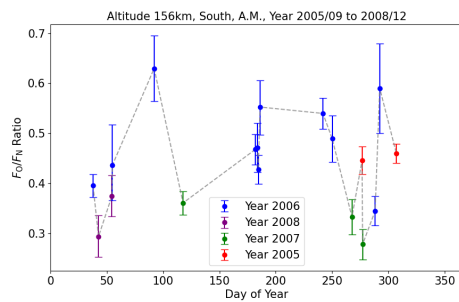
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度156 km



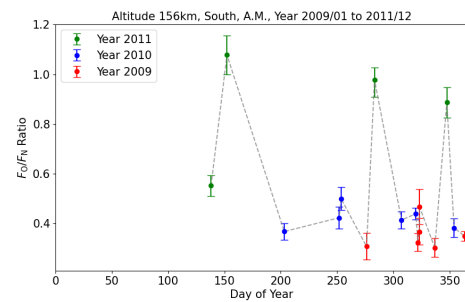
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度156 km



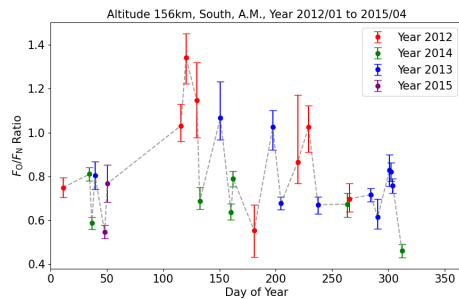
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度156 km



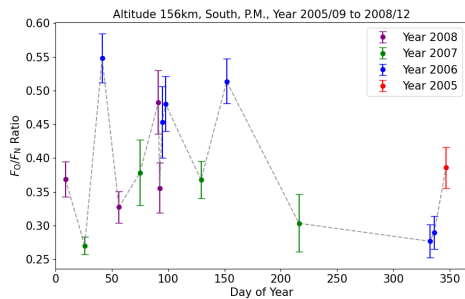
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度156 km



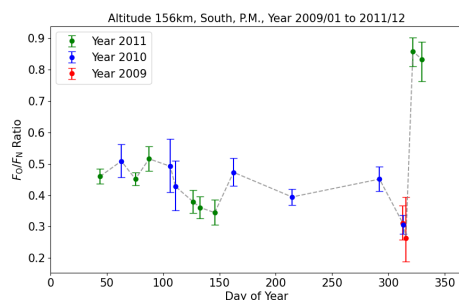
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度156 km



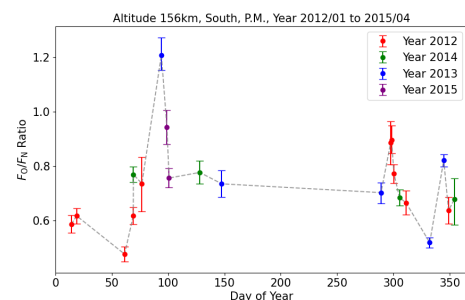
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度156 km



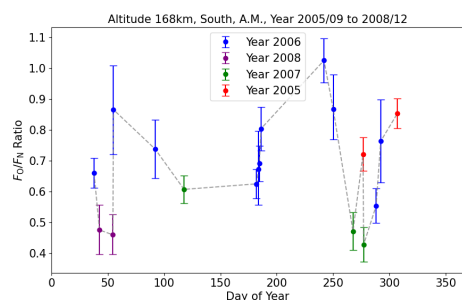
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度156 km



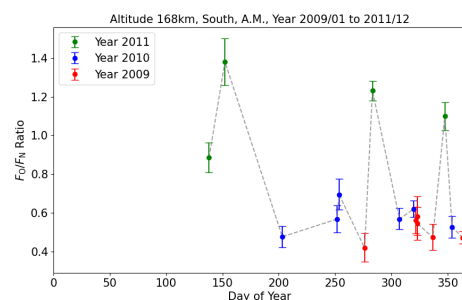
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度156 km



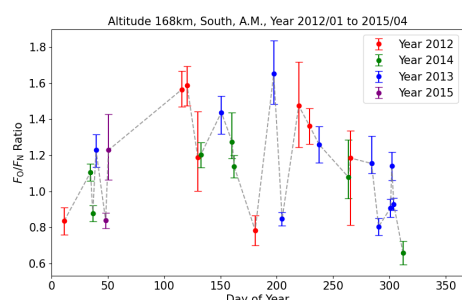
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度156 km



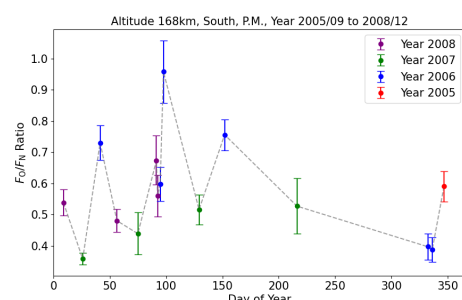
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度168 km



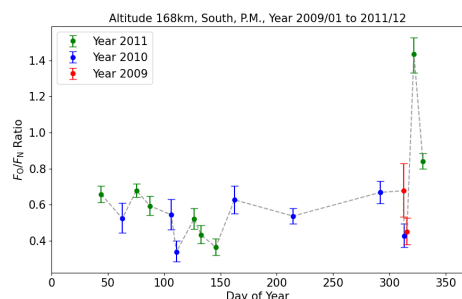
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度168 km



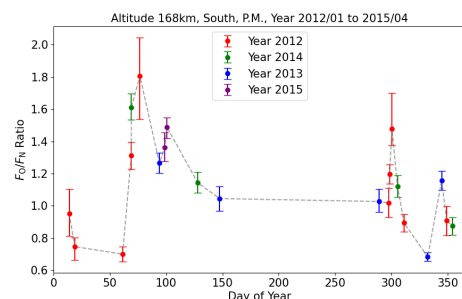
2012 — 2015 年、午前、南半球: 高度168 km



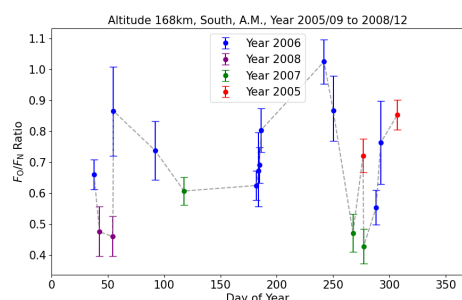
2005 — 2008 年、午後、南半球: 高度168 km



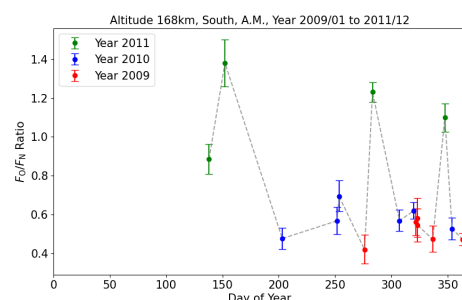
2009 — 2011 年、午後、南半球: 高度168 km



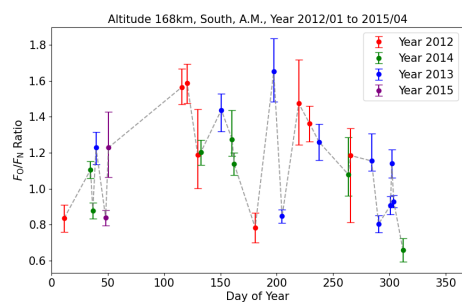
2012 — 2015 年、午後、南半球: 高度168 km



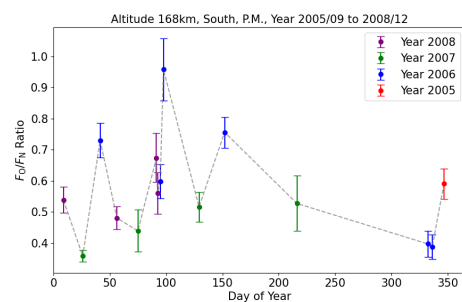
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度168 km



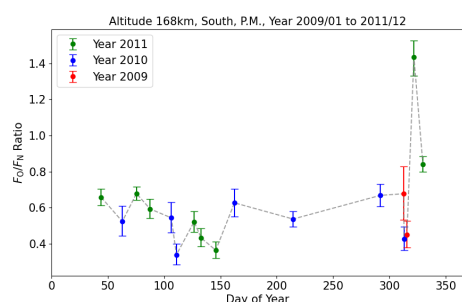
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度168 km



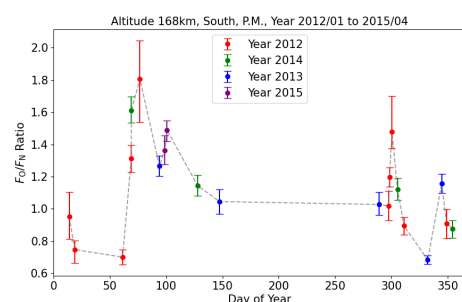
2012 — 2015 年、午前、南半球: 高度168 km



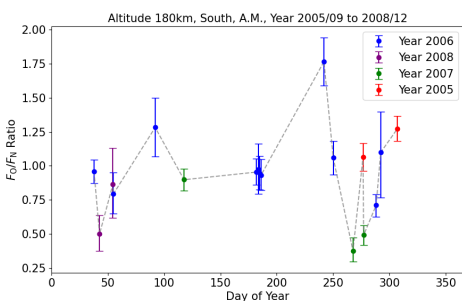
2005 — 2008 年、午後、南半球: 高度168 km



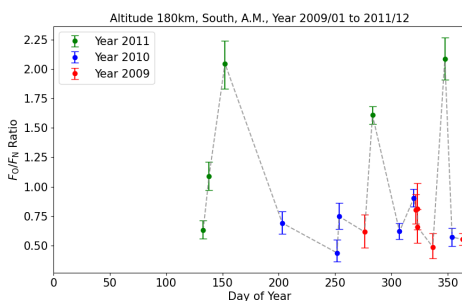
2009 — 2011 年、午後、南半球: 高度168 km



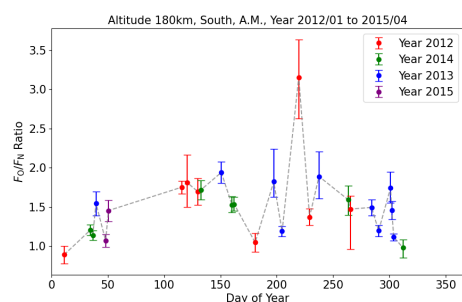
2012 — 2015 年、午後、南半球: 高度168 km



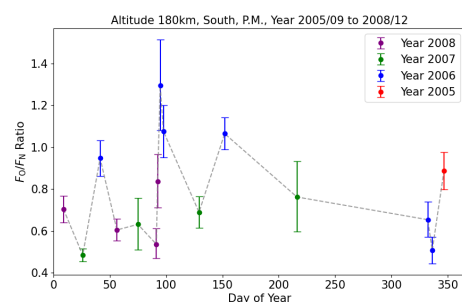
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度180 km



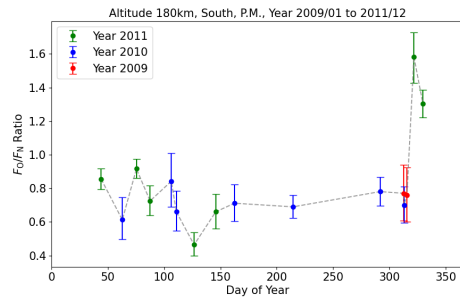
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度180 km



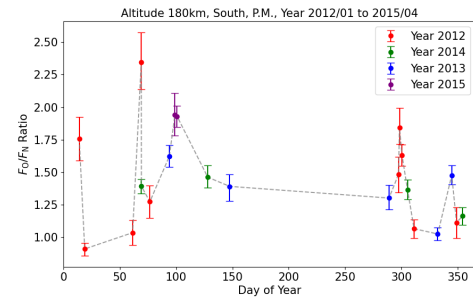
2012 — 2015 年、午前、南半球: 高度180 km



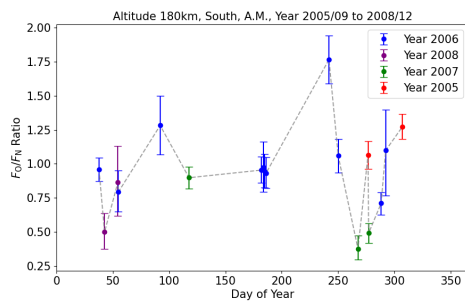
2005 — 2008 年、午後、南半球: 高度180 km



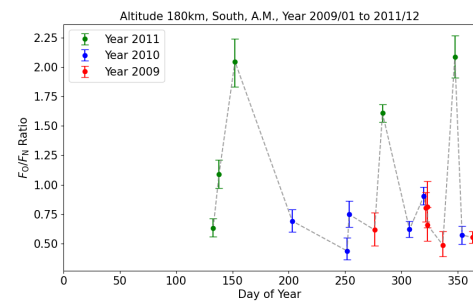
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度180 km



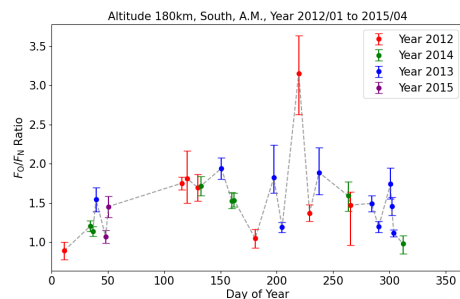
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度180 km



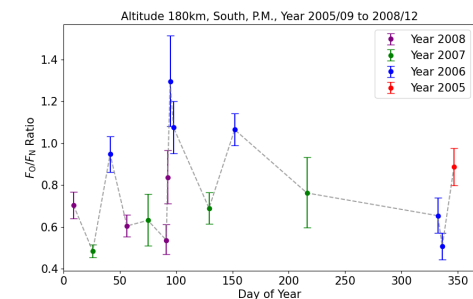
2005 – 2008 年、午前、南半球: 高度180 km



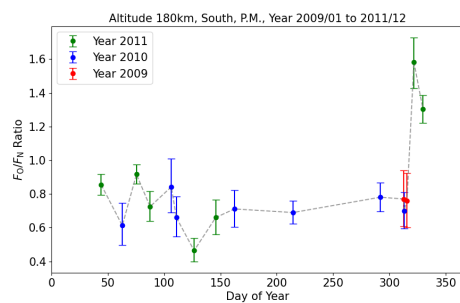
2009 – 2011 年、午前、南半球: 高度180 km



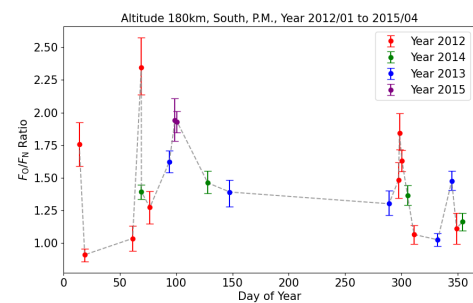
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度180 km



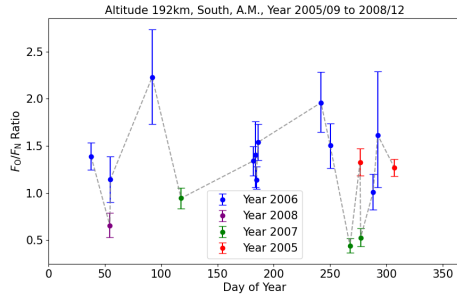
2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度180 km



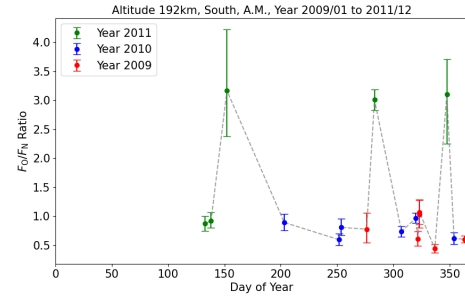
2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度180 km



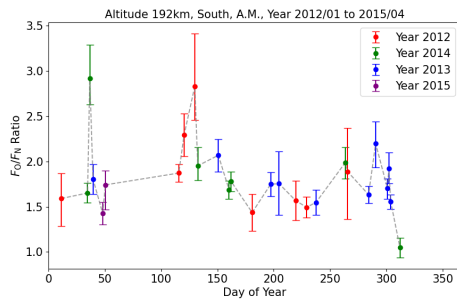
2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度180 km



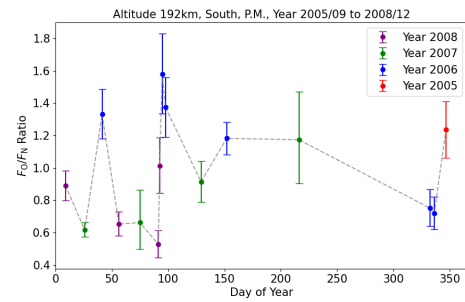
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度192 km



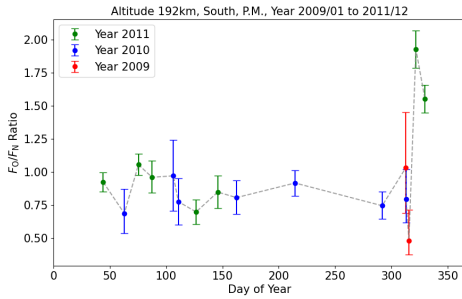
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度192 km



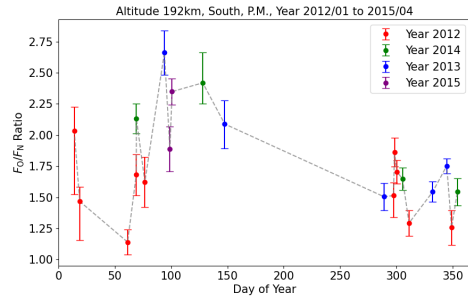
2012 — 2015 年、午前、南半球: 高度192 km



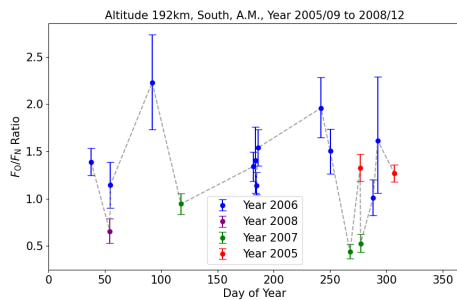
2005 — 2008 年、午後、南半球: 高度192 km



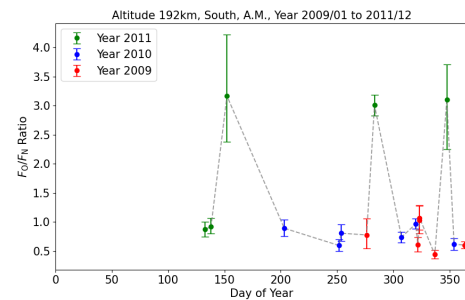
2009 — 2011 年、午後、南半球: 高度192 km



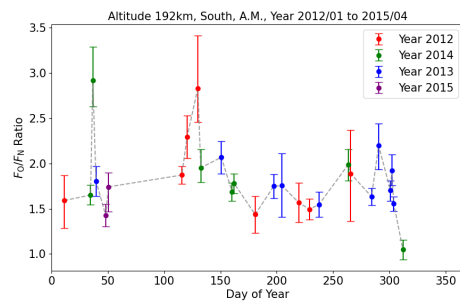
2012 — 2015 年、午後、南半球: 高度192 km



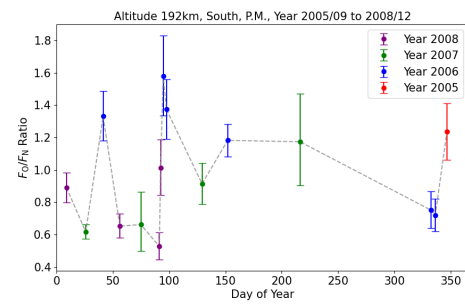
2005 — 2008 年、午前、南半球: 高度192 km



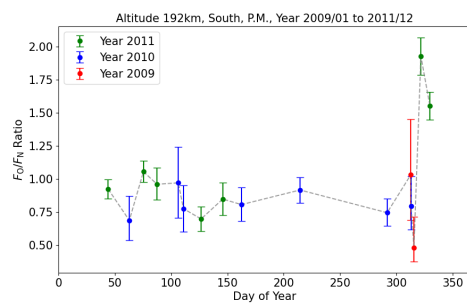
2009 — 2011 年、午前、南半球: 高度192 km



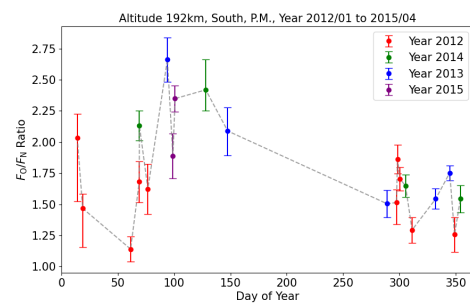
2012 – 2015 年、午前、南半球: 高度192 km



2005 – 2008 年、午後、南半球: 高度192 km



2009 – 2011 年、午後、南半球: 高度192 km

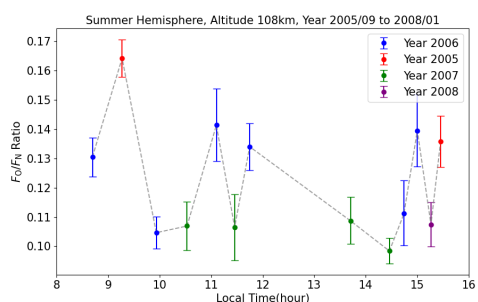


2012 – 2015 年、午後、南半球: 高度192 km

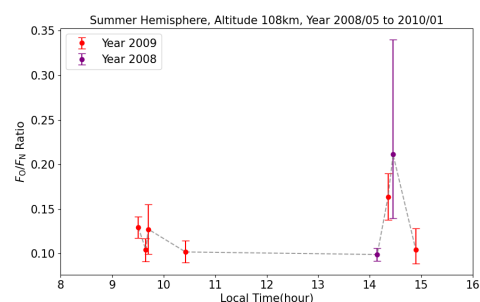
付録 D

酸素/窒素 Flux 比のローカルタイム依存性

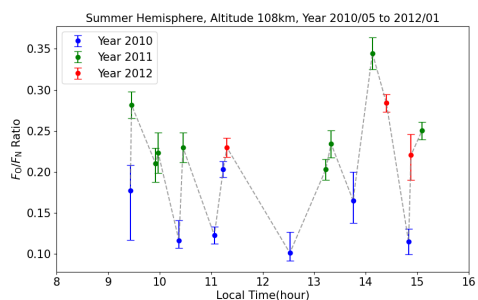
以下に「すざく」観測の酸素/窒素 Flux 比のローカルタイム依存性を示す。ただし、その他の影響；長期変動、季節依存性 (夏半球 or 冬半球) を排除するためにソートしプロットしている。ここでの夏半球は北半球の 5 月～7 月、南半球の 11 月～2 月であり冬半球は北半球の 11 月～2 月、南半球の 6 月～9 月である。



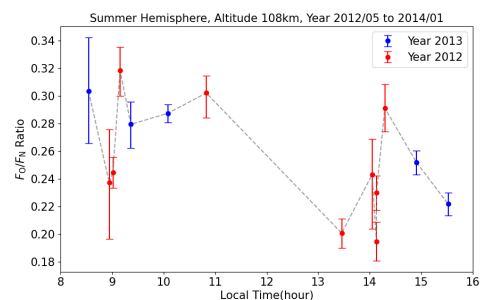
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度108 km



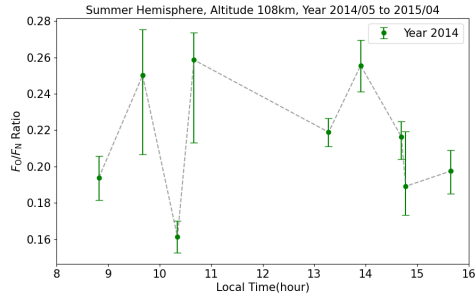
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度108 km



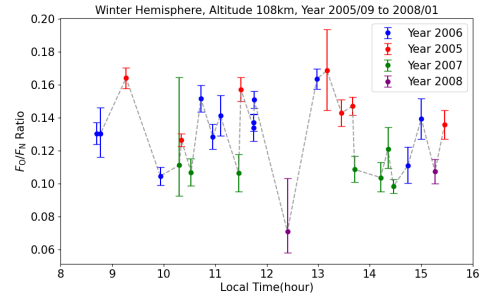
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度108 km



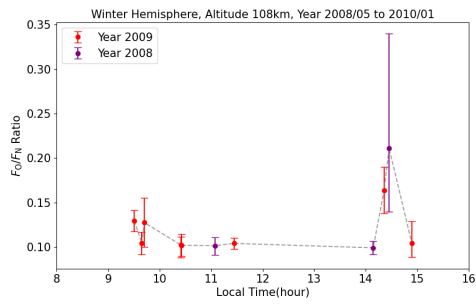
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度108 km



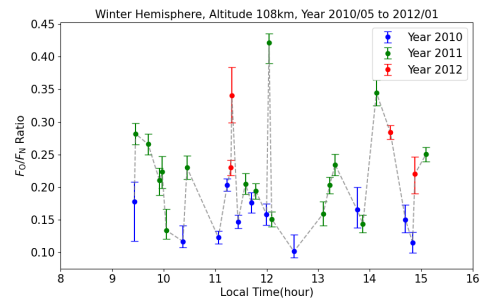
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度108 km



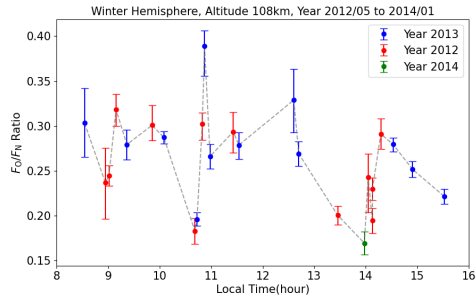
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度108 km



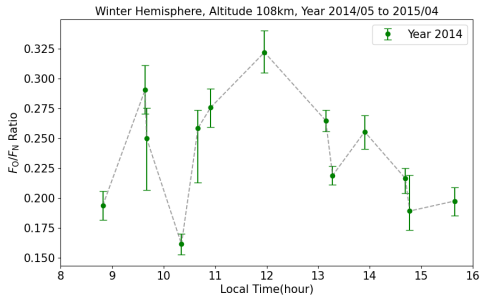
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度108 km



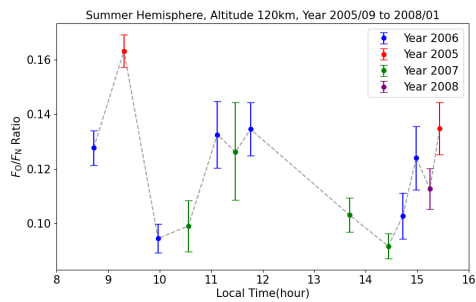
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度108 km



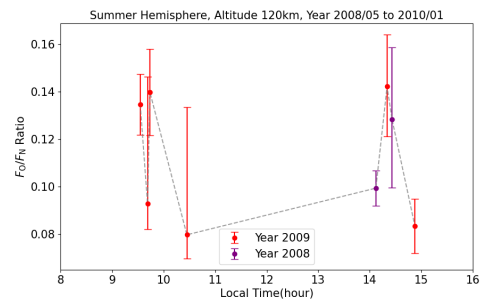
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度108 km



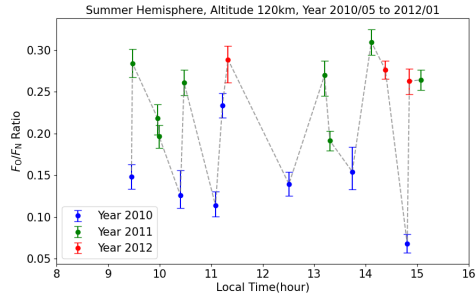
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度108 km



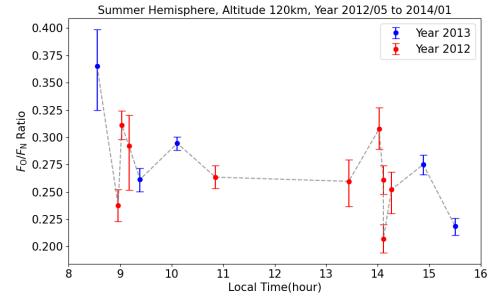
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度120 km



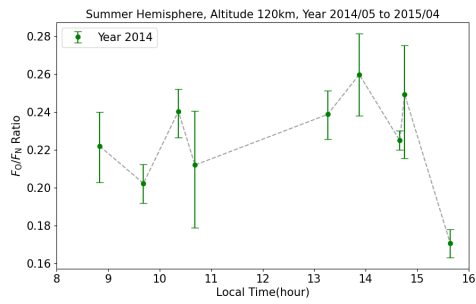
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度120 km



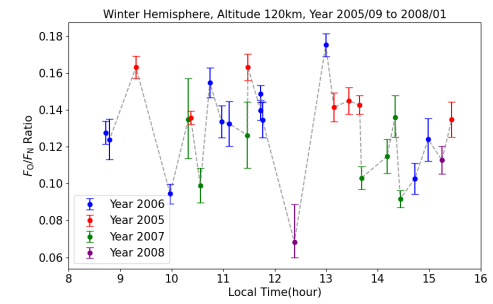
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度120 km



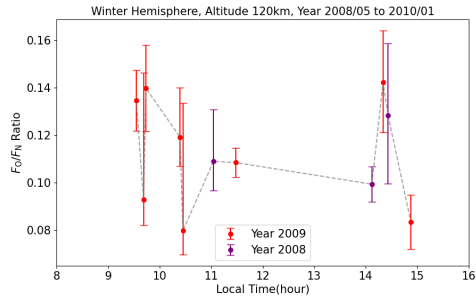
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度120 km



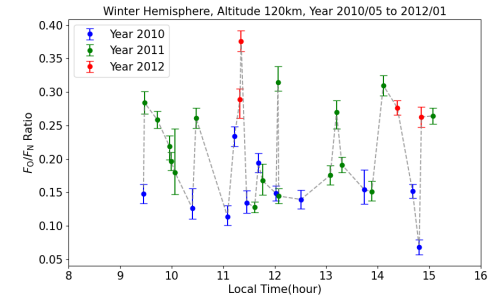
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度120 km



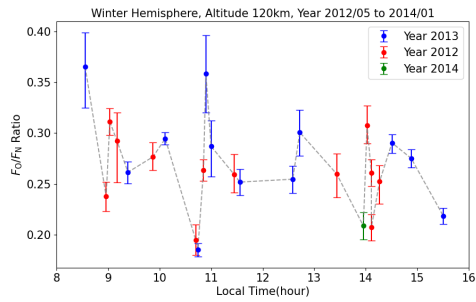
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度120 km



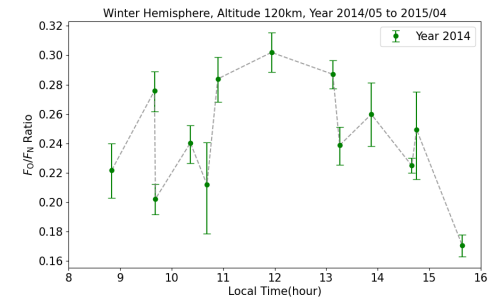
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度120 km



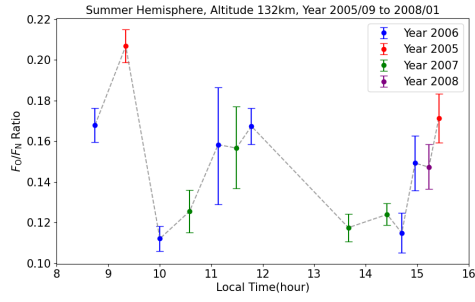
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度120 km



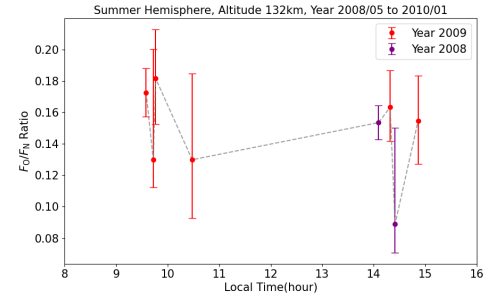
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度120 km



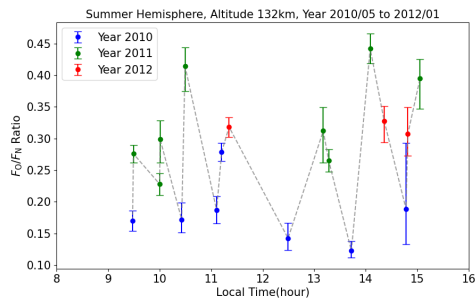
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度120 km



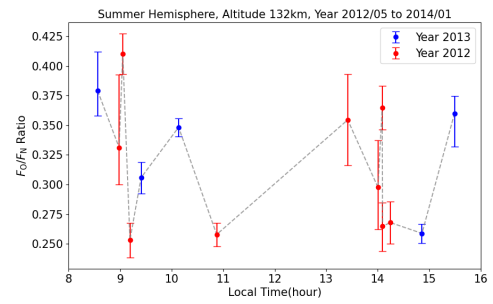
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度132 km



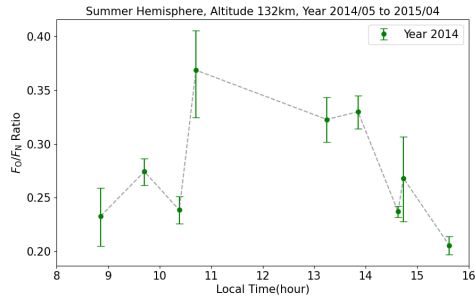
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度132 km



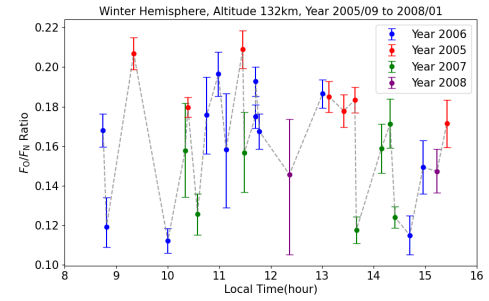
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度132 km



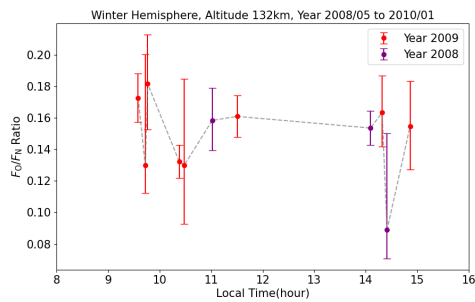
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度132 km



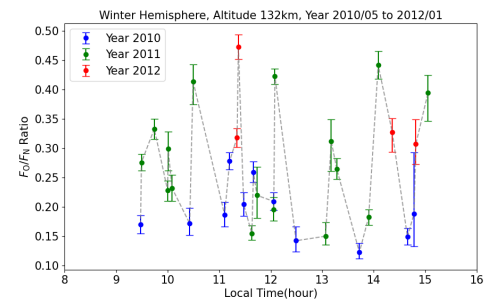
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度132 km



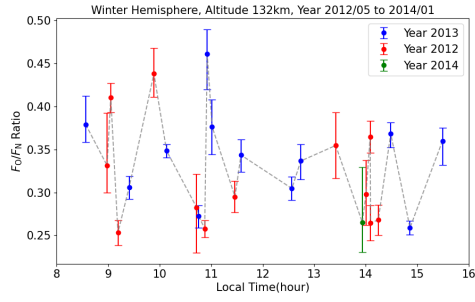
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度132 km



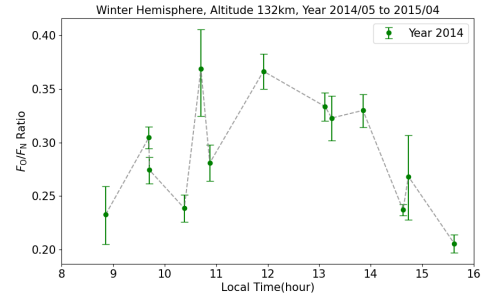
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度132 km



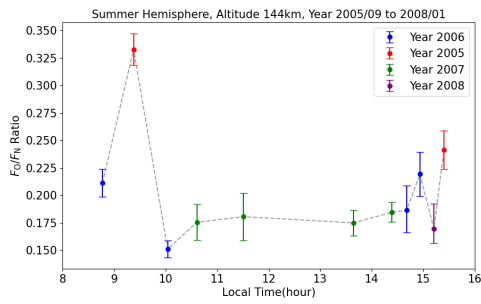
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度132 km



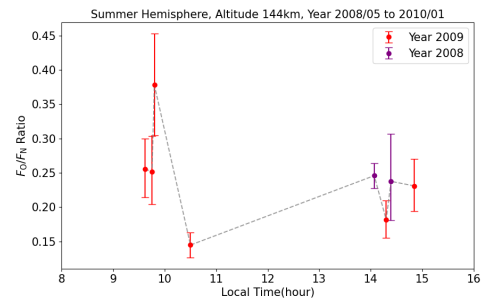
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度132 km



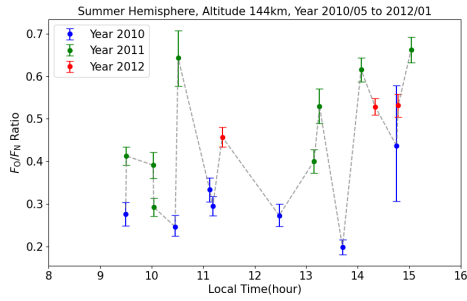
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度132 km



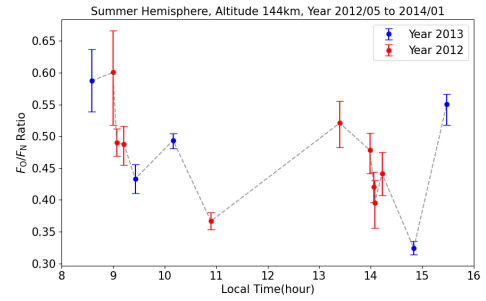
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度144 km



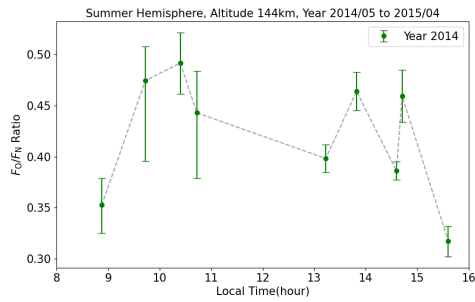
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度144 km



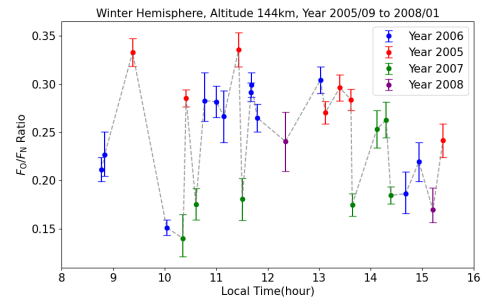
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度144 km



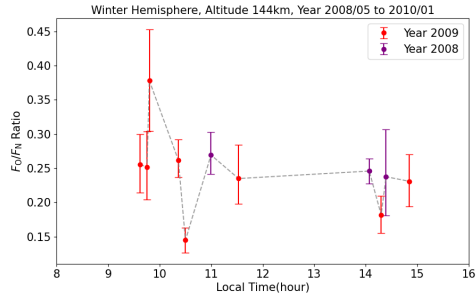
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度144 km



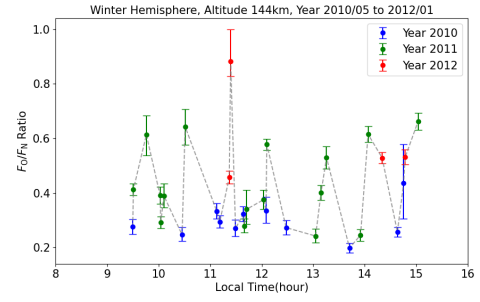
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度144 km



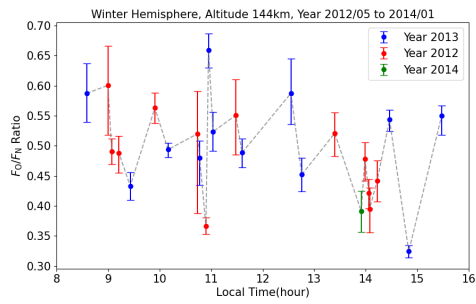
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度144 km



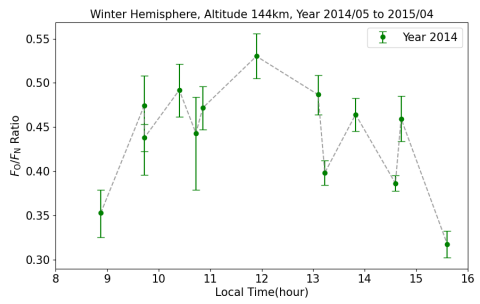
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度144 km



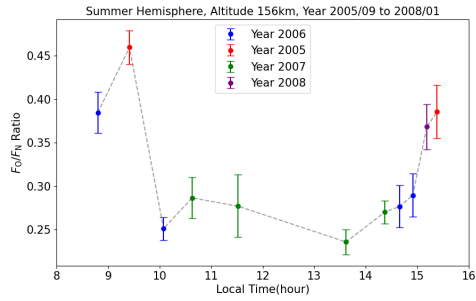
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度144 km



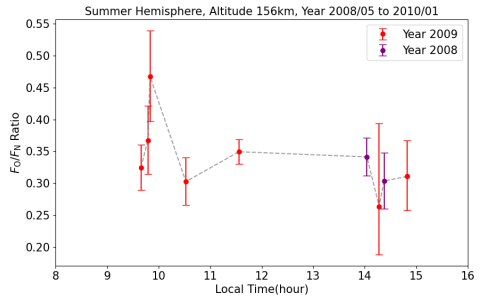
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度144 km



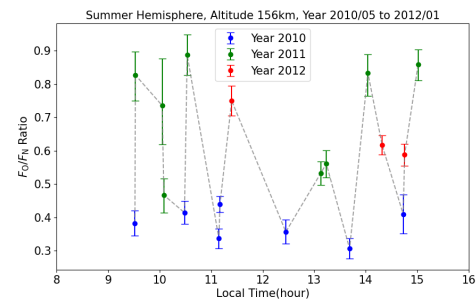
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度144 km



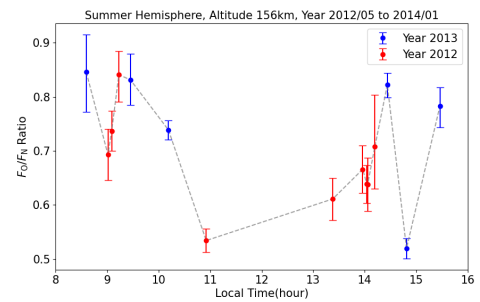
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度156 km



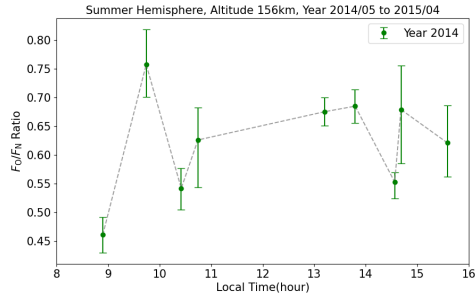
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度156 km



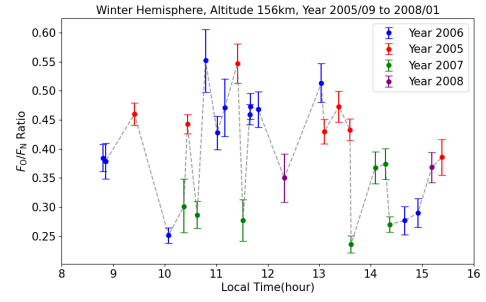
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度156 km



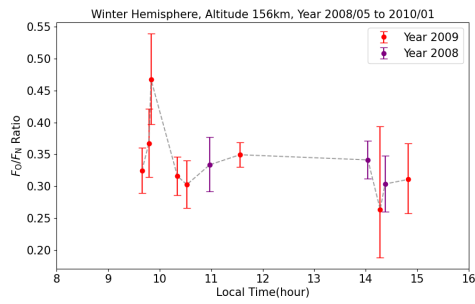
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度156 km



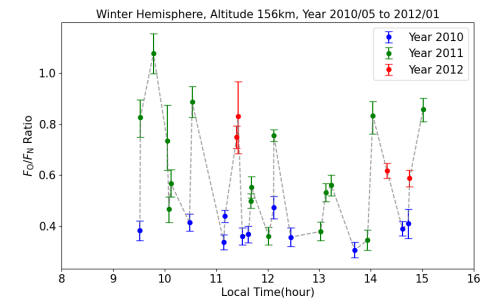
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度156 km



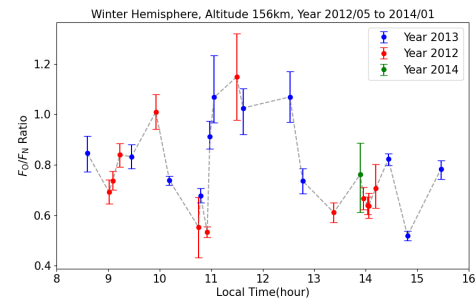
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度156 km



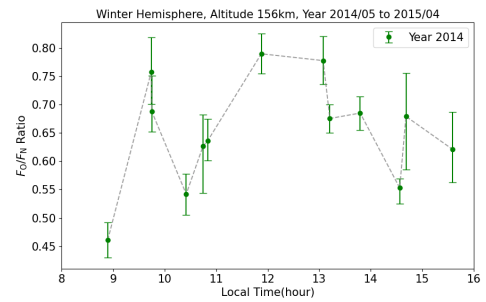
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度156 km



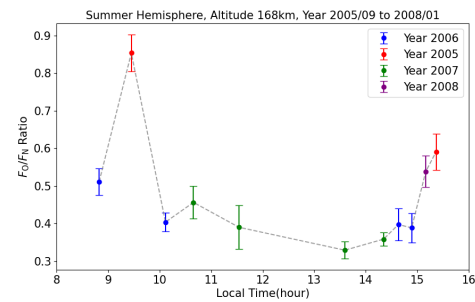
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度156 km



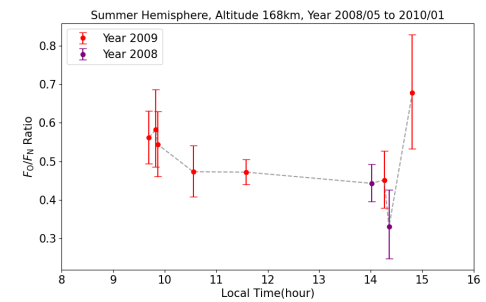
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度156 km



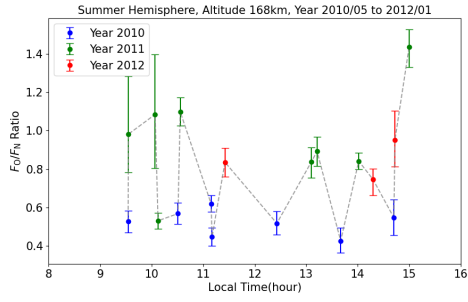
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度156 km



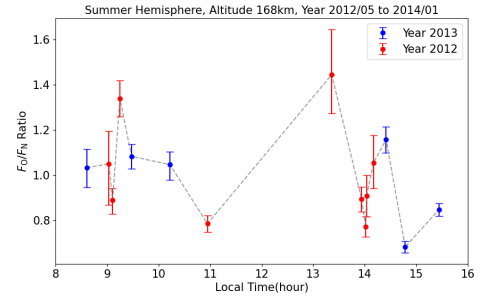
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度168 km



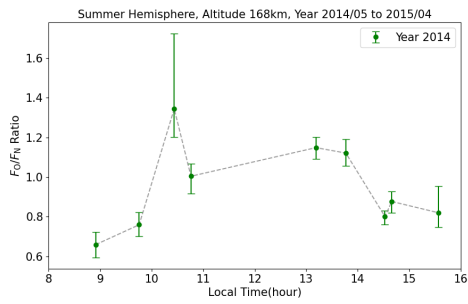
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度168 km



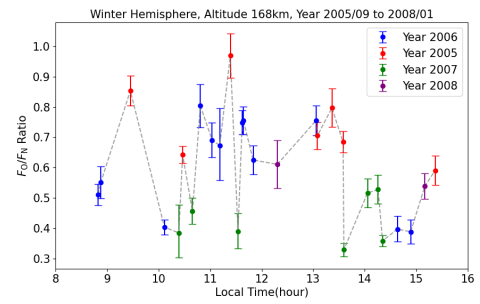
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度168 km



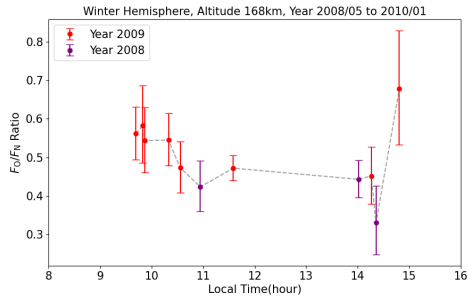
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度168 km



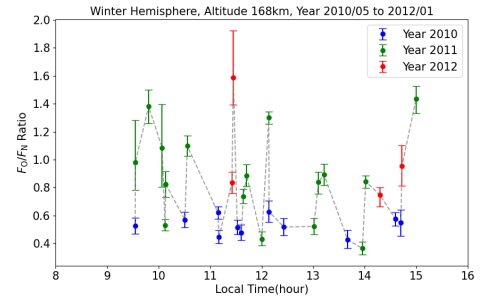
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度168 km



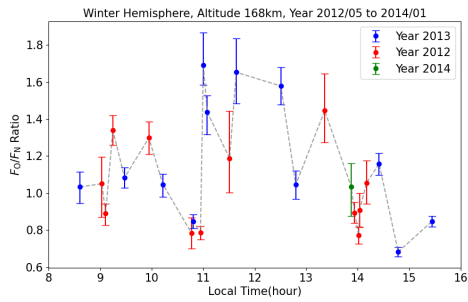
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度168 km



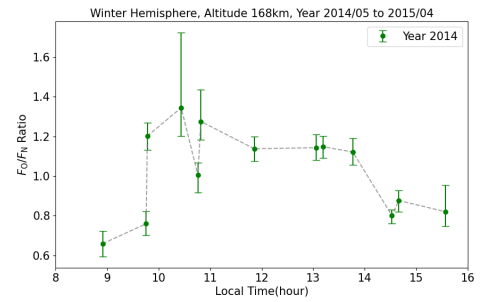
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度168 km



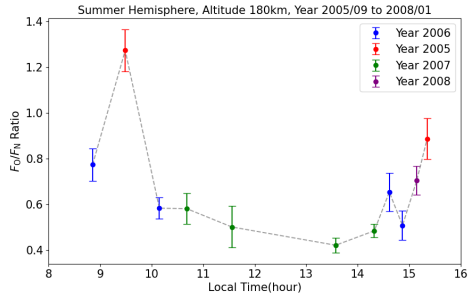
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度168 km



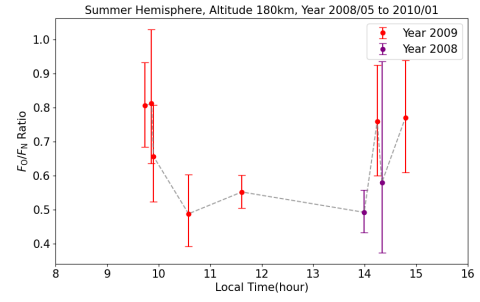
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度168 km



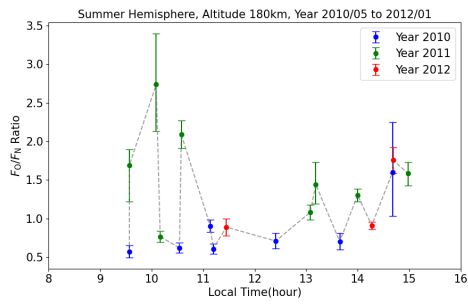
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度168 km



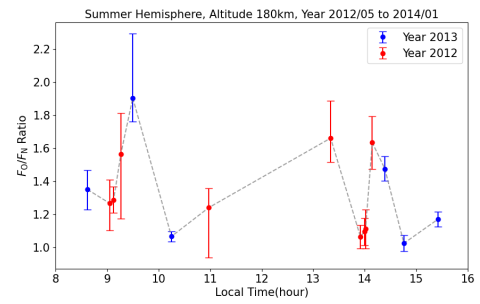
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度180 km



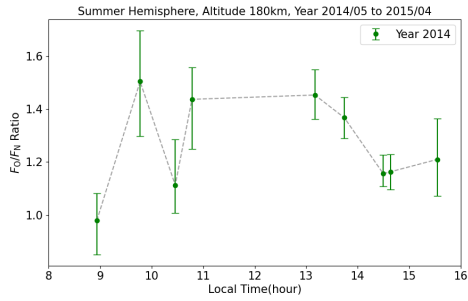
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度180 km



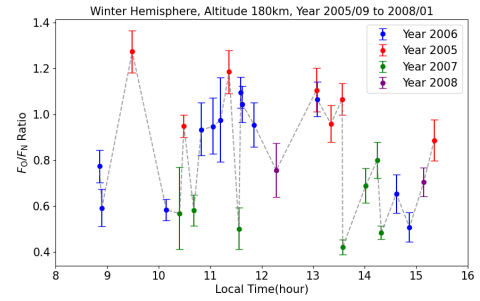
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度180 km



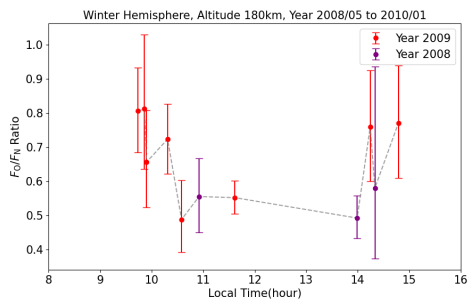
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度180 km



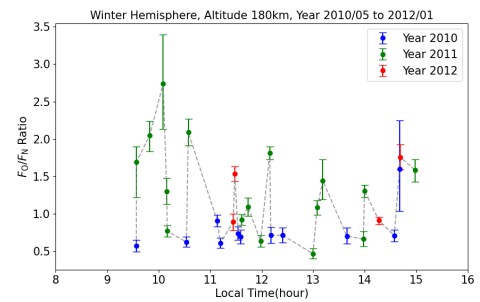
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度180 km



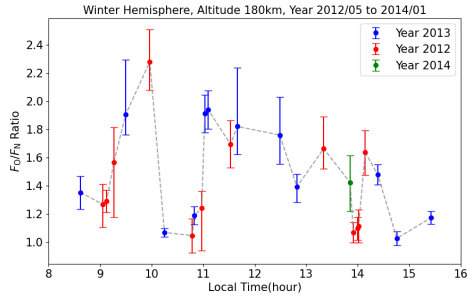
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度180 km



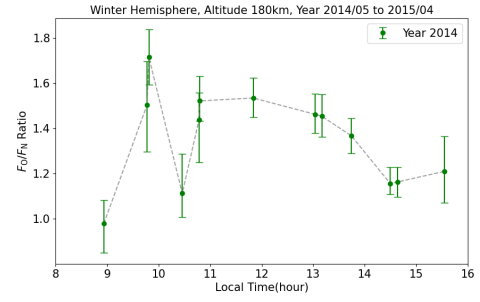
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度180 km



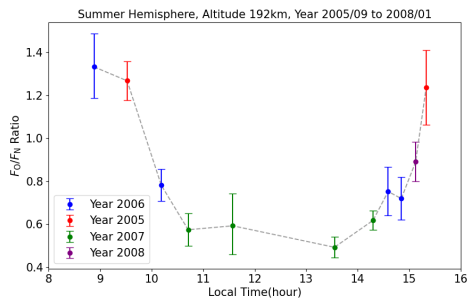
2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度180 km



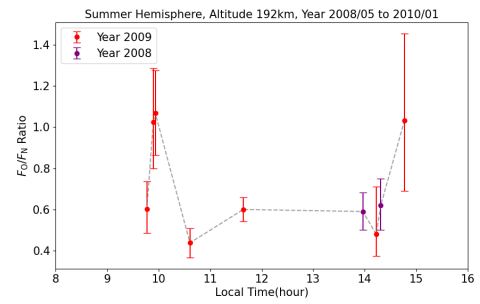
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度180 km



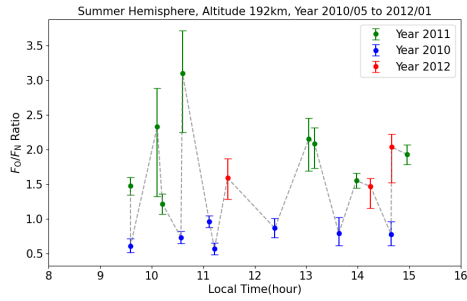
2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度180 km



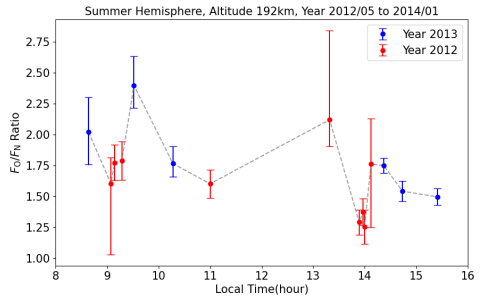
2005/09 – 2008/01、夏半球: 高度192 km



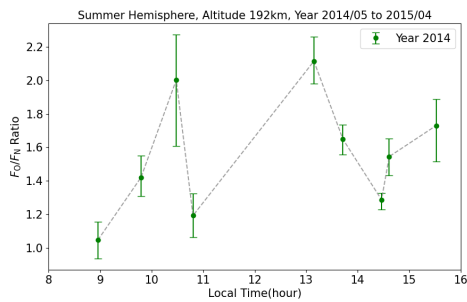
2008/05 – 2010/01、夏半球: 高度192 km



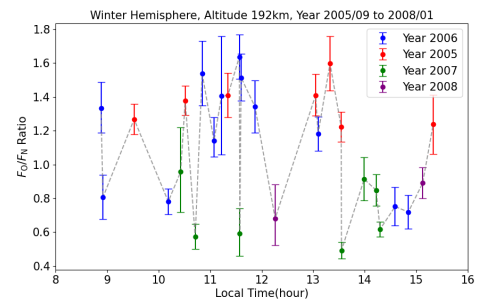
2010/05 – 2012/01、夏半球: 高度192 km



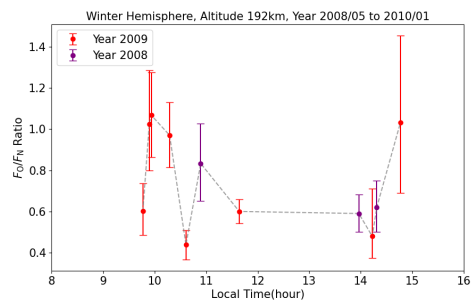
2012/05 – 2014/01、夏半球: 高度192 km



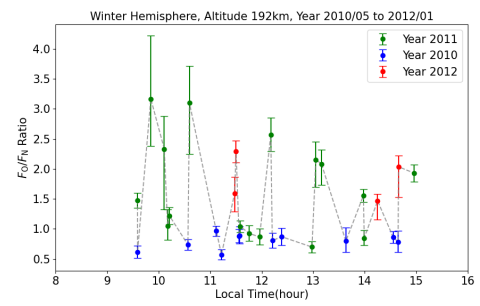
2014/05 – 2015/04、夏半球: 高度192 km



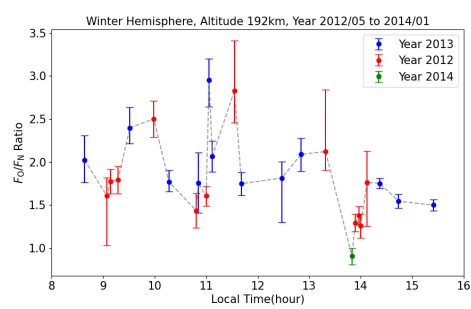
2005/09 – 2008/01、冬半球: 高度192 km



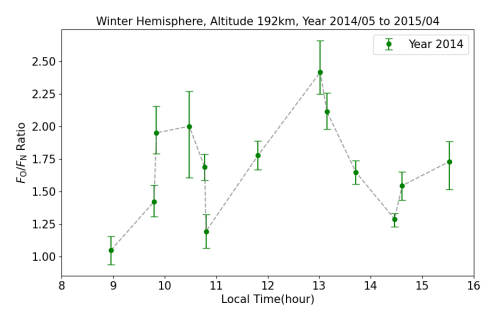
2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度192 km



2010/05 – 2012/01、冬半球: 高度192 km



2008/05 – 2010/01、冬半球: 高度192 km



2014/05 – 2015/04、冬半球: 高度192 km

参考文献

- [1] Lu, G., Richmond, A. D., Lühr, H., and Paxton, L., 2016, High-latitude energy input and its impact on the thermosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 121, 7108-7124. [doi:10.1002/2015JA022294](https://doi.org/10.1002/2015JA022294).
- [2] Liu, H. L., 2016, Variability and predictability of the space environment as related to lower atmosphere forcing. *Space weather*. 14, 634-658. [doi:10.1002/2016SW001450](https://doi.org/10.1002/2016SW001450).
- [3] Sassi, F., McCormack, J. P., and McDonald, S. E., 2019, Whole atmosphere coupling on intraseasonal and interseasonal time scales: A potential source of increased predictive capability. *Radio Sci.* 54, 913-933. [doi:10.1029/2019RS006847](https://doi.org/10.1029/2019RS006847).
- [4] 理科年表オフィシャルサイト気象部「超高層大気」をくわしく解説！ 2025 年 01 月 14 日アクセス.
- [5] WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels
- [6] 永田武・等松隆夫 (1973) 『超高層大気の物理学』裳華房
- [7] Offermann, D., Jarisch, J., Schmidt, H., Oberheide, J., Grossmann, K. U., Gusev, O., et al., 2007, The “wave turbopause” . *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 69 (17), 2139-2158. [doi:10.1016/j.jastp.2007.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.05.012).
- [8] 天文学辞典大気の窓 2025 年 01 月 14 日アクセス.
- [9] 森田佳恵, 修士論文 (埼玉大学 2018)
- [10] Emmert, J., Drob, D., Picone, J., Siskind, D., Jones, M., Mlyneczek, M., et al., 2021, Nrlmsis 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. *Earth Space Sci.* 8 (3), e2020EA001321. [doi:10.1029/2020EA001321](https://doi.org/10.1029/2020EA001321).
- [11] Lucas, Greg., 2023, pymsis (v0.7.0). *Zenodo*. [doi:10.5281/zenodo.7581692](https://doi.org/10.5281/zenodo.7581692).
- [12] Huba, J. D., G. Joyce, and J. A. Fedder, 2000, Sami2 is Another Model of the Ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model, *J. Geophys. Res.*, 105(A10), 23035-23053. [doi:10.1029/2000JA000035](https://doi.org/10.1029/2000JA000035).
- [13] Oberheide, J., Shiokawa, K., Gurubaran, S., Ward, W., Fujiwara, H., Kosch, M., et al., 2015, The geospace response to variable inputs from the lower atmosphere: A review of the progress made by Task Group 4 of CAWSES-II. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2 (1), 2. [doi:10.1186/s40645-014-0031-4](https://doi.org/10.1186/s40645-014-0031-4).
- [14] Qian, L., and Solomon, S., 2012, Thermospheric density: An Overview of temporal and spatial variations. *Space Sci. Rev.* 168 (1), 147-173. [doi:10.1007/s11214-011-9810-z](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9810-z).
- [15] Emmert, J. T., 2015a, Altitude and solar activity dependence of 1967-2005 thermospheric density trends derived from orbital drag. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 120 (4), 2940-2950. [doi:10.1002/2015JA021047](https://doi.org/10.1002/2015JA021047).
- [16] Rishbeth, H., 1998, How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 60 (14), 1385-1402. [doi:10.1016/S1364-6826\(98\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00062-5).
- [17] Liu, H., Yamazaki, Y., and Lei, J., 2021, ‘Day-to-Day variability of the thermosphere and ionosphere’ , upper atmosphere dynamics and energetics. *Washington, D.C., United States: American Geophysical Union*,

- 275-300. doi:10.1002/9781119815631.ch1510.1002/9781119815631.ch15.
- [18] Jones M Jr, Emmert JT, Gan Q and Yue J., 2022, On the importance of neutral composition and temperature measurements in the 100–200 km altitude region. *Front. Astron. Space Sci.* 9:1062967. doi:10.3389/fspas.2022.1062967.
 - [19] Dhadly M, Sassi F, Emmert J, Drob D, Conde M, Wu Q, Makela J, Budzien S and Nicholas A, 2023, Neutral winds from mesosphere to thermosphere—past, present, and future outlook. *Front. Astron. Space Sci.* 9:1050586. doi: 10.3389/fspas.2022.1050586.
 - [20] Yuan, T., Stevens, M., Englert, C., and Immel, T., 2021, Temperature tides across the mid-Latitude summer turbopause measured by a Sodium lidar and MIGHTI/ICON. *J. Geophys. Res. Atmos.* 126 (16), e2021JD035321. doi:10.1029/2021JD035321.
 - [21] Chu, X., Yu, Z., Gardner, C., Chen, C., and Fong, W., 2011, Lidar observations of neutral Fe layers and fast gravity waves in the thermosphere (110–155 km) at McMurdo (77.8°S, 166.7°E), Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* 38 (23). doi:10.1029/2011GL050016.
 - [22] Immel, T., England, S., Mende, S., Heelis, R., Englert, C., Edelstein, J., et al., 2017, The ionospheric connection Explorer mission: Mission Goals and Design. *Space Sci. Rev.* 214 (1), 13. doi:10.1007/s11214-017-0449-2.
 - [23] Eastes, R., McClintock, W., Burns, A., Anderson, D., Andersson, L., Codrescu, M., et al., 2017, The Global-scale observations of the Limb and Disk (GOLD) mission. *Space Sci. Rev.* 212 (1), 383-408. doi:10.1007/s11214-017-0392-2.
 - [24] Jeng-Hwa Yee, Elsayed R. Talaat, Andrew B. Christensen, Timothy L. Killeen, James M. Russell III, and Thomas N. Woods., 2003, TIMED Instruments. *JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 24, NUMBER 2 (2003)*, 156-164.
 - [25] Hedin, A., Salah, J., Evans, J., Reber, C., Newton, G., Spencer, N., et al., 1977a, A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS, 1. N₂ density and temperature. *J. Geophys. Res.* 82 (16), 2139-2147. doi:10.1029/JA082i016p02139.
 - [26] Hedin, A., Reber, C., Newton, G., Spencer, N., Brinton, H., Mayr, H., et al., 1977b, A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS, 2. Composition. *J. Geophys. Res.* 82 (16), 2148-2156. doi:10.1029/JA082i016p02148.
 - [27] Hedin, A., 1987, MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.* 92 (A5), 4649-4662. doi:10.1029/JA092iA05p04649.
 - [28] Hedin, A., 1991, Extension of the MSIS Thermosphere Model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 96 (A2), 1159-1172. doi:10.1029/90JA02125.
 - [29] Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., and Aikin, A. C., 2002, NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 107 (A12), 15-21. doi:10.1029/2002JA009430.
 - [30] Bermejo-Pantaleón, D., Funke, B., López-Puertas, M., García-Comas, M., Stiller, G., Clarmann, T., et al., 2011, Global observations of thermospheric temperature and nitric oxide from MIPAS spectra at 5.3 μm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 116 (A10). doi:10.1029/2011JA016752.
 - [31] Meier, R., Picone, J., Drob, D., Bishop, J., Emmert, J., Lean, J., et al., 2015, Remote sensing of Earth's Limb by TIMED/GUVI: Retrieval of thermospheric composition and temperature. *Earth Space Sci.* 2 (1), 1-37.

[doi:10.1002/2014EA000035](https://doi.org/10.1002/2014EA000035).

- [32] Oberheide, J., Forbes, J. M., Zhang, X., and Bruinsma, S. L., 2011, Climatology of upward propagating diurnal and semidiurnal tides in the thermosphere. *J. Geophys. Res.* 116 (A11). [doi:10.1029/2011JA016784](https://doi.org/10.1029/2011JA016784).
- [33] 「すざく」ファーストステップガイド第 4.0.2 版 (Process Version 2.1-2.3)
- [34] 「すざく」 Technical Description
- [35] 穴田貴康, 修士論文 (東京大学 2006)
- [36] Katsuji Koyama, Hiroshi Tsunemi, Tadayasu Dotani, Mark W. Bautz, Kiyoshi Hayashida, Takeshi Go Tsuru, Hironori Matsumoto, Yoshiaki Ogawara, George R. Ricker, John Doty, Steven E. Kissel, Rick Foster, Hiroshi Nakajima, Hiroya Yamaguchi, Hideyuki Mori, Masaaki Sakano, Kenji Hamaguchi, Mamiko Nishiuchi, Emi Miyata, Ken'ichi Torii, Masaaki Namiki, Satoru Katsuda, Daisuke Matsuura, Tomofumi Miyauchi, Naohisa Anabuki, Noriaki Tawa, Masanobu Ozaki, Hiroshi Murakami, Yoshitomo Maeda, Yoshinori Ichikawa, Gregory Y. Prigozhin, Edward A. Boughan, Beverly LaMarr, Eric D. Miller, Barry E. Burke, James A. Gregory, Allen Pillsbury, Aya Bamba, Junko S. Hiraga, Atsushi Senda, Haruyoshi Katayama, Shunji Kitamoto, Masahiro Tsujimoto, Takayoshi Kohmura, Yohko Tsuboi, Hisamitsu Awaki, 2007, X-Ray Imaging Spectrometer (XIS) on Board Suzaku. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 59, Issue sp1, 30 January 2007, Pages S23-S33, [doi:10.1093/pasj/59.sp1.S23](https://doi.org/10.1093/pasj/59.sp1.S23).
- [37] 内山秀樹, 博士論文 (京都大学 2007)
- [38] Hiroshi Nakajima, Hiroya Yamaguchi, Hironori Matsumoto, Takeshi Go Tsuru, Katsuji Koyama, Hiroshi Tsunemi, Kiyoshi Hayashida, Ken'ichi Torii, Masaaki Namiki, Satoru Katsuda, Masayuki Shoji, Daisuke Matsuura, Tomofumi Miyauchi, Tadayasu Dotani, Masanobu Ozaki, Hiroshi Murakami, Mark W. Bautz, Steve E. Kissel, Beverly LaMarr, Gregory Y. Prigozhin, Performance of the Charge-Injection Capability of Suzaku XIS. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 60, Issue sp1, 20 February 2008, Pages S1-S9, [arXiv:0705.1771](https://arxiv.org/abs/0705.1771).
- [39] [XIS Spaced-row Charge Injection \(SCI\) - darts - JAXA](#) 2024 年 11 月 26 日アクセス.
- [40] [Suzaku XIS Calibration Status in 2012](#), 2024 年 12 月 03 日アクセス.
- [41] [IACHEC 2014, Suzaku XIS Contamination Status](#) Eric D. Miller (MIT), Bev LaMarr (MIT), M. Tsujimoto, K. Wada (ISAS/JAXA) 2024 年 11 月 26 日アクセス.
- [42] Satoru Katsuda, Masanori Ohno, Koji Mori, Tatsuhiko Beppu, Yoshiaki Kanemaru, Makoto S. Tashiro, Yukikatsu Terada, Kosuke Sato, Kae Morita, Hikari Sagara, Futa Ogawa, Haruya Takahashi, Hiroshi Murakami, Masayoshi Nobukawa, Hiroshi Tsunemi, Kiyoshi Hayashida, Hironori Matsumoto, Hirofumi Noda, Hiroshi Nakajima, Yuichiro Ezoe, Yohko Tsuboi, Yoshitomo Maeda, Takaaki Yokoyama, and Noriyuki Narukage, 2020, Inverse FIP Effects in Giant Solar Flares Found from Earth X-Ray Albedo with Suzaku/XIS. *The Astrophysical Journal*, Volume 891, Issue 2, id.126, 13 pp. [doi:10.3847/1538-4357/ab7207](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7207).
- [43] Li, Z., Luan, X., Lei, J., Ren, D., 2024, An investigation of the local time behavior of $\Sigma O/N_2$ during solstice. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2023JA032045. [doi:10.1029/2023JA032045](https://doi.org/10.1029/2023JA032045).
- [44] Qian, L., A. G. Burns, S. C. Solomon, W. Wang, Y. Zhang., 2016, Solar cycle variations of thermospheric composition at the solstices, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 3740-3749. [doi:10.1002/2016JA022390](https://doi.org/10.1002/2016JA022390).
- [45] Khan, J., Younas, W., Khan, M., Amory-Mazaudier, C., 2022, Climatology of O/N_2 Variations at Low- and Mid-Latitudes during Solar Cycles 23 and 24. *Atmosphere*, 13(10), 1645. [doi:10.3390/atmos13101645](https://doi.org/10.3390/atmos13101645).
- [46] Yue, J., Jian, Y., Wang, W., Meier, R. R., Burns, A., Qian, L., et al., 2019, Annual and semiannual oscillations

- of thermospheric composition in TIMED/GUVI limb measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 3067-3082. doi:10.1029/2019JA026544.
- [47] Meier R. R., et al., 2015, Remote Sensing of Earth's Limb by TIMED/GUVI: Retrieval of thermospheric composition and temperature. *Earth and Space Science*, 2, 1-37. doi:10.1002/2014EA000035.
- [48] Qian, L., Gan, Q., Wang, W., Cai, X., Eastes, R., Yue, J., 2022, Seasonal variation of thermospheric composition observed by NASA GOLD. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030496. doi:10.1029/2022JA030496.
- [49] Burns, A. G., S. C. Solomon, W. Wang, L. Qian, Y. Zhang, L. J. Paxton, X. Yue, J. P. Thayer, H. L. Liu., 2015, Explaining solar cycle effects on composition as it relates to the winter anomaly. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 5890-5898. doi:10.1002/2015JA021220.
- [50] Zhang, Y., and L. J. Paxton., 2011, Long-term variation in the thermosphere: TIMED/GUVI observations. *J. Geophys. Res.*, 116, A00H02. doi:10.1029/2010JA016337.
- [51] Li, Z., Luan, X., Lei, J., Ren, D., 2022, A simulation study on the variation of thermospheric O/N₂ with solar activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030305. doi:10.1029/2022JA030305
- [52] Janet Machol, Rodney Viereck, Courtney Peck, James Mothersbaugh, [GOES X-ray Sensor \(XRS\) Operational Data, 17 June 2022, Version 1.5](#) 2025 年 02 月 01 日アクセス.
- [53] Meier, R., G. Crowley, D. J. Strickland, A. B. Christensen, L. J. Paxton, D. Morrison, C. L. Hackert., 2005, First look at the 20 November 2003 superstorm with TIMED/GUVI: Comparisons with a thermospheric global circulation model. *J. Geophys. Res.*, 110, A09S41, doi:10.1029/2004JA010990.
- [54] Strickland, D. J., J. S. Evans, J. Correia., 2012, Comment on “Long-term variation in the thermosphere:TIMED/GUVI observations” by Y. Zhang and L. J. Paxton. *J. Geophys. Res.*, 117, A07302. doi:10.1029/2011JA017350.
- [55] Lean, J. L., R. R. Meier, J. M. Picone, and J. T. Emmert., 2011, Ionospheric total electron content: Global and hemispheric climatology. *J. Geophys. Res.*, 116, A10318. doi:10.1029/2011JA016567
- [56] Lopez Izurieta, E D and Toapanta Guamanarca, E and Barbier, H., 2022, Ionospheric total electron content (TEC) above Ecuador. *Journal of Physics: Conference Series.*, 2238 012010. doi:10.1088/1742-6596/2238/1/012010.
- [57] Yamazaki, Y., and A. D. Richmond., 2013, A theory of ionospheric response to upward-propagating tides: Electrodynamic effects and tidal mixing effects, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 5891-5905. doi:10.1002/jgra.50487.