

# 「すざく」の昼地球観測データを用いた 超高層大気の中・長期変動調査

埼玉大学大学院理工学研究科

宇宙物理実験研究室 M1

山脇鷹也

2023/06/30

# CONTENTS

## I. Introduction

- i. 超高層大気の観測意義
- ii. 研究目的
- iii. 昼地球の観測方法
  - 1. 地没データ
  - 2. X線天文衛星「すざく」
- iv. 解析手法

## II. Result & Discussion

- i. Fluxの高度依存性
- ii. 中期変動・先行研究との比較
- iii. 長期変動
  - 1. 太陽X線Fluxとの相関
  - 2. 「すざく」SCIモードチェンジの影響？

## III. Conclusion

# 超高層大気の観測意義

**超高層大気領域：高度 80 km以上の熱圏以上の領域**

超高層大気の研究は、実用上重要な意味を持つ。

## 1. 気候変動

- 地表(極圏) : 温暖化(10年で約 0.75 °C)
- 上層大気(極圏) : 寒冷化(1年で約 -1.4 °C) → 地表よりも敏感

## 2. 密度変動

- 人工衛星が通過する領域 → 大気圏突入の場所と時間の予測精度向上
- 密度変動 → 空気抵抗も変動

## 3. 電離変動

- 地盤変動・海面高度などは人工衛星を用いて測定される
- 測定結果は電離層の状態に影響される
- 電離層補正を適用することで精度向上

## 4. 宇宙天気予報

- 宇宙天気：主にCME(コロナ質量放出)・太陽風などの太陽活動に伴う磁気圏や超高層大気の変動
- 宇宙天気が乱れると、地上での通信障害、衛星障害などを引き起こし、社会生活に影響を及ぼす可能性がある

→ 太陽と超高層大気の相互作用を調査し宇宙天気予報の精度を向上

高度(km)

1000

500

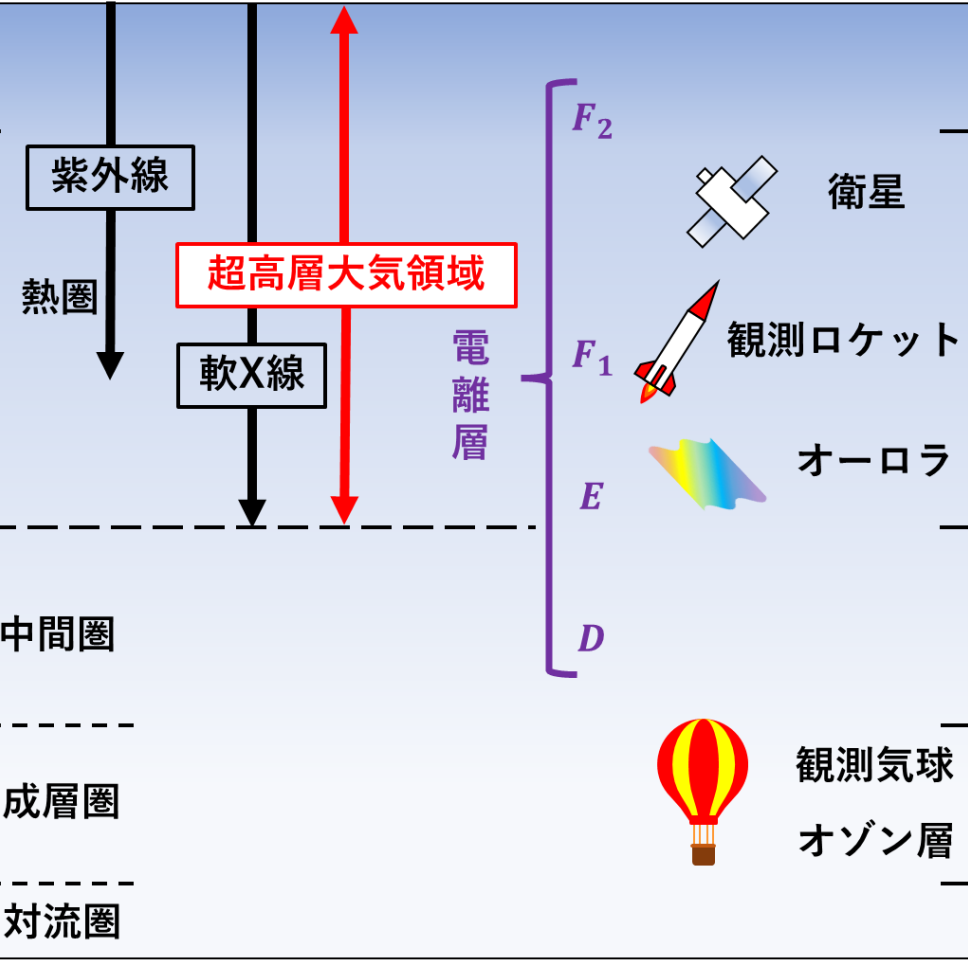
80

50

10

0

大気区分



人工衛星では低すぎ、気球では高すぎるため、中間圏～熱圏下部(MLT)領域は観測例が少ない

どうにか観測する方法はないか？

# 本研究の目的

## 目的：

X線天文衛星「すざく」の約10年分の昼地球観測データ(計238個)を使い、長期・中期にわたる超高層大気(高度 100-200 km)の酸素/窒素比の変動を調査する。またスペクトルを任意の高度区間に分割して抽出することで、酸素/窒素比の変動の高度依存性を調査する。

### ◆ 中期(季節)変動：

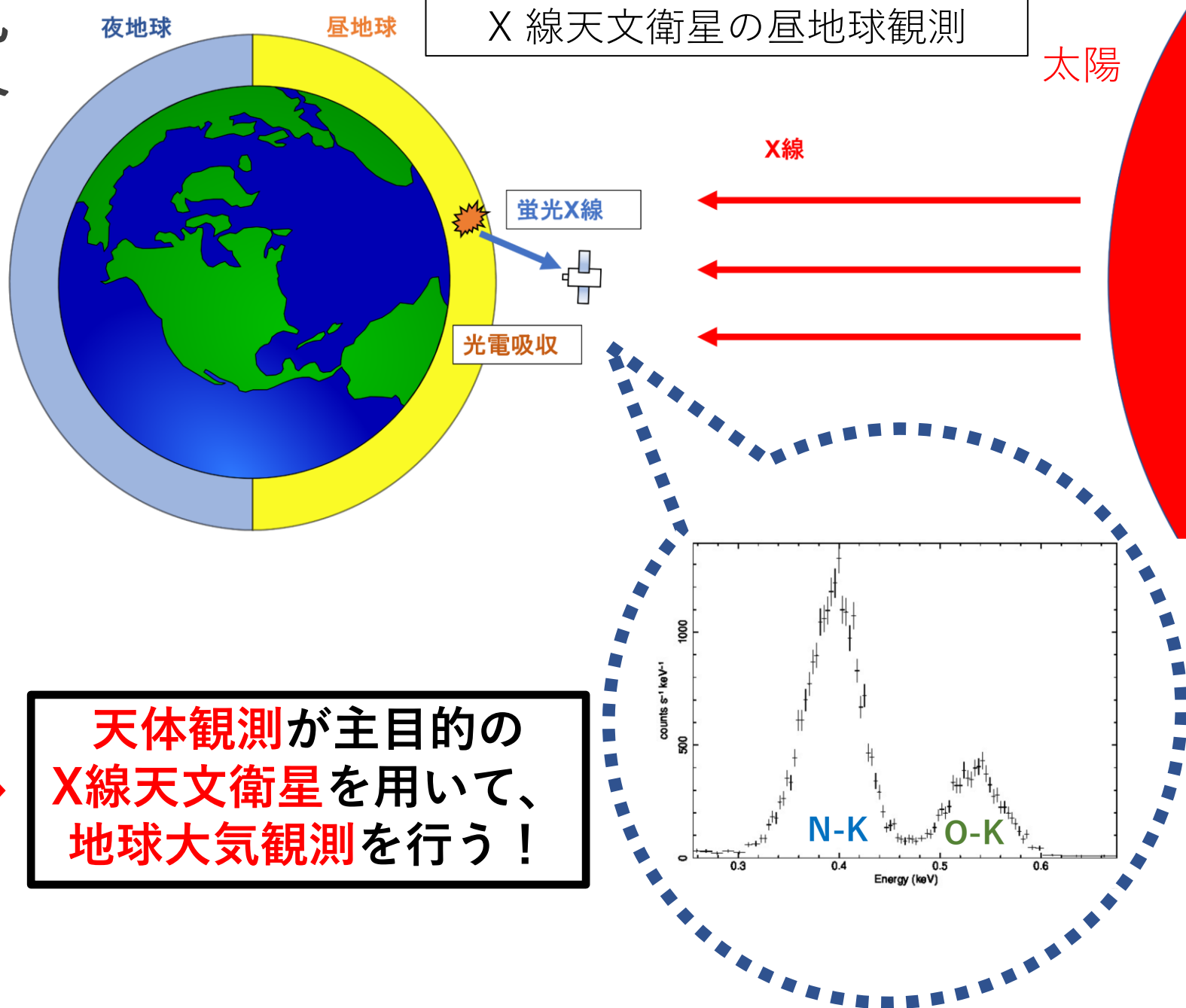
- O/N比が季節依存性を持つことは先行研究で示されている(Meier R. R., et al. 2015 ; Lean et al. 2011)。「すざく」でも検出できるか？

### ◆ 長期(10年)変動：

- 太陽活動が11年の周期性を持つ。太陽活動は大気組成に影響を与えるのか？

# 観測方法：地没

- ◆ 超高層大気の新たな観測手法として、地球低軌道を周回するX線天文衛星を活用する
- ◆ X線天文衛星は軌道上を固定姿勢で周回している
  - 天体が地球の影に隠れる時間(地没)が存在
- ◆ このとき、望遠鏡は地球に向いている。つまり、衛星は地球観測を避けられない。
- ◆ 宇宙空間からのX線が地球大気(100 km付近)に入射したときに光電吸収され、蛍光X線が放出される。
  - X線天文衛星はこの蛍光X線も観測している！

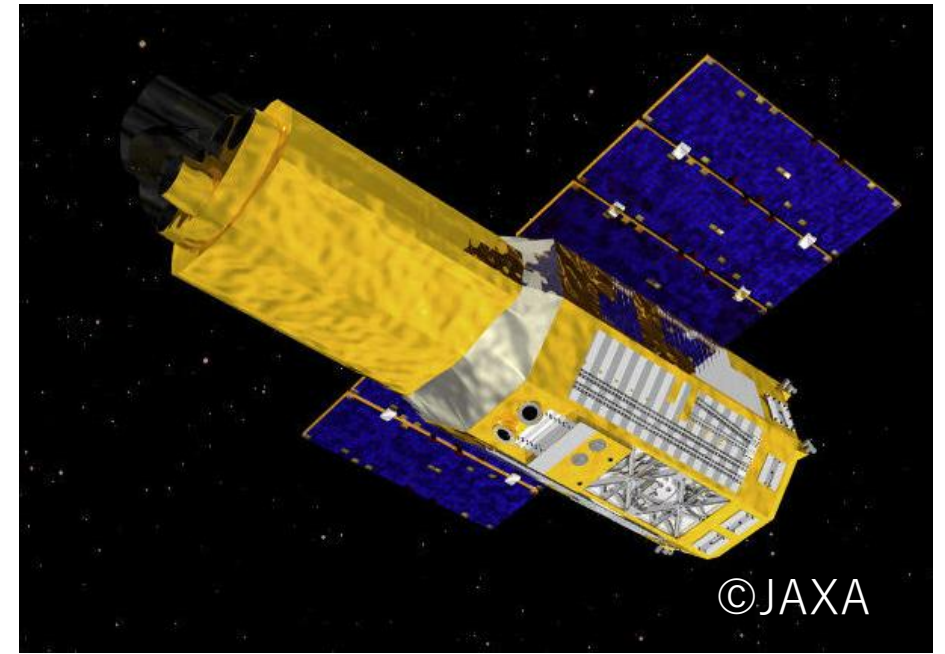


**天体観測が主目的の  
X線天文衛星を用いて、  
地球大気観測を行う！**

# 観測方法：検出器

## X線天文衛星「すざく」

- ◆ 実稼働時間：2005年9月～2015年6月の**約10年**
- ◆ 軌道高度：**550 km**
- ◆ 軌道傾斜角：31°
- ◆ X線望遠鏡(XRT)・X線マイクロカロリメータ(XRS)・X線CCDカメラ(XIS)からなる5つの軟X線検出器と、硬X線検出器(HXD)を搭載



## 軟X線CCDカメラ「XIS」

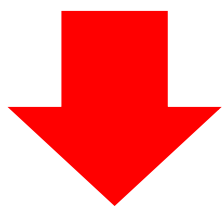
- ◆ CCD：半導体検出器を2次元アレイ状に並べたもの
- ◆ 表面照射型(FI)CCD：**エネルギー分解能**に優れる。XIS0・XIS2・XIS3
- ◆ 裏面照射型(BI)CCD：**低エネルギー側**で有利。XIS1
- ◆ 窒素・酸素輝線を見るため、**XIS1**を使う。

### XISの性能

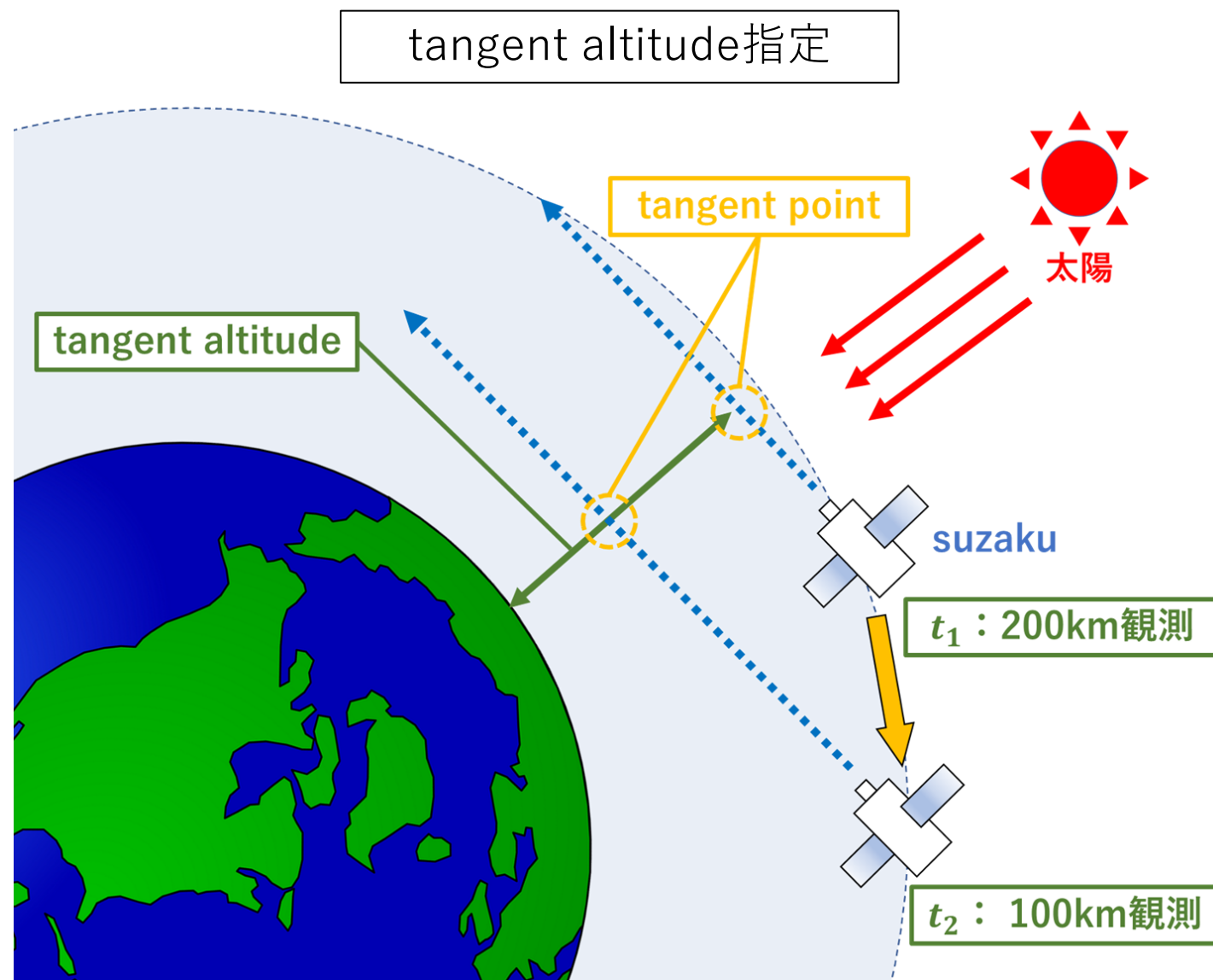
視野	17'.8 × 17'.8
エネルギー帯域	0.2-12 keV
有効画素数	1024 × 1024
1画素のサイズ	24 μm × 24 μm
エネルギー分解能	~ 130 eV @ 6 keV
有効面積 (XRT-I 込み)	340 cm <sup>2</sup> (FI), 390 cm <sup>2</sup> (BI) @ 1.5 keV 350 cm <sup>2</sup> (FI), 100 cm <sup>2</sup> (BI) @ 8 keV
時間分解能	8 s (Normal mode), 7.8 ms (P-Sum mode)

# 解析手法

- ◆ 各OBS dataには観測時刻やイベント情報の他、衛星位置(altitude, latitude, longitude)、太陽高度、地球接線と視線方向とのなす角(ELV)などの情報がある。
- ◆ これらの情報から、特定の高度からのX線放射のスペクトルを切り出すことができる。



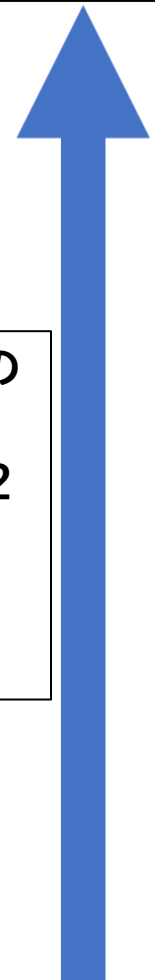
**大気組成の  
高度依存性を見れる！**



# 解析手法

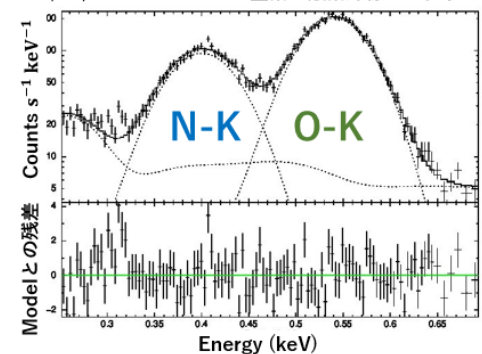
36~60 km、48~72 km・・・184~208 kmのように区間 24 km、間隔 12 kmでスペクトルを抽出。2つのガウシアンと1つの冪関数でスペクトルをモデルフィット。ベストフィットパラメータから、窒素・酸素Fluxを求め、O/N比を推定した。

高度 高

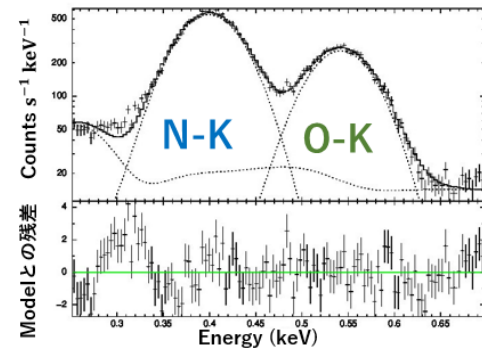


0.25-0.7 keVのスペクトルをガウシアン×2 & Powerlawでフィット

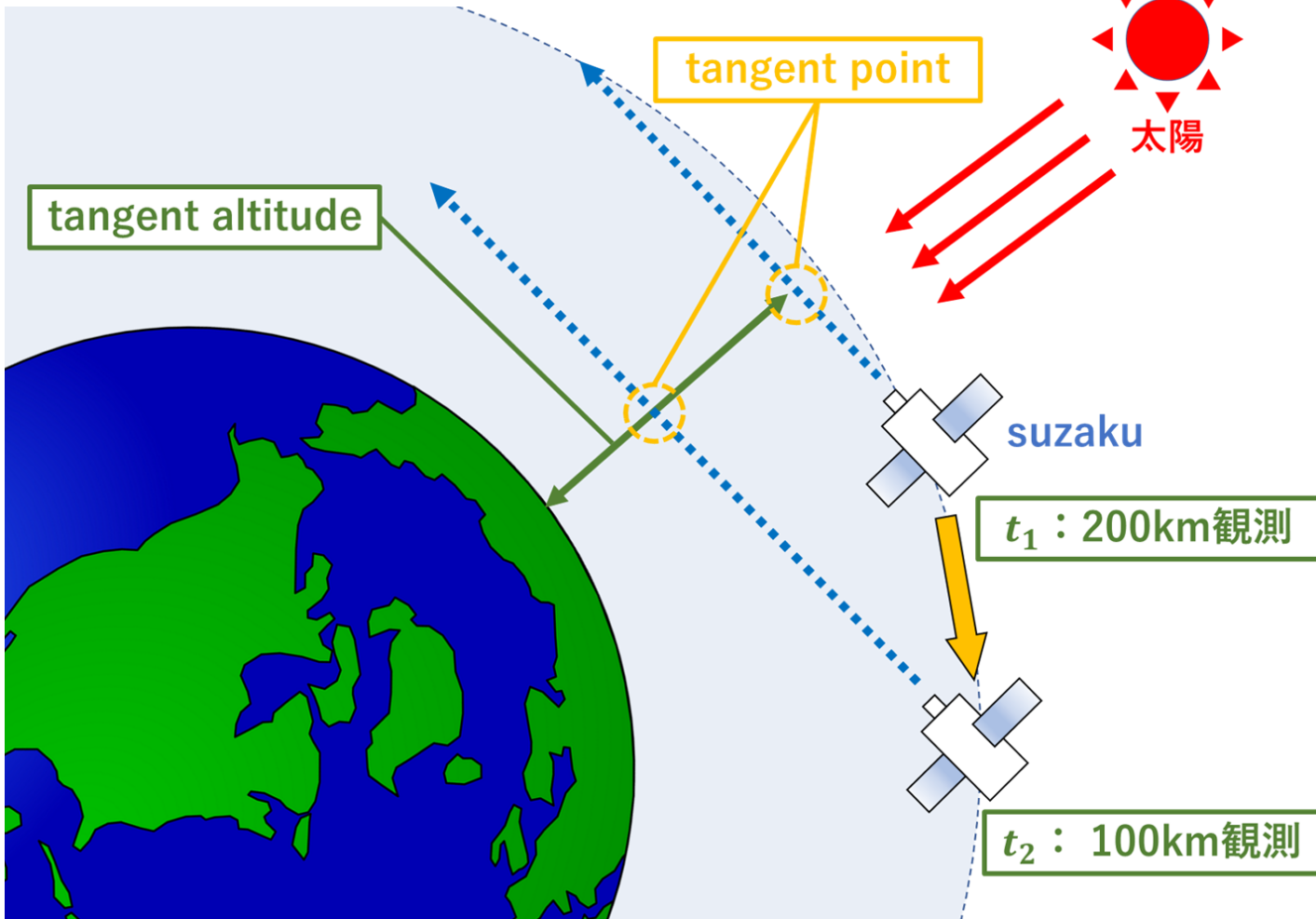
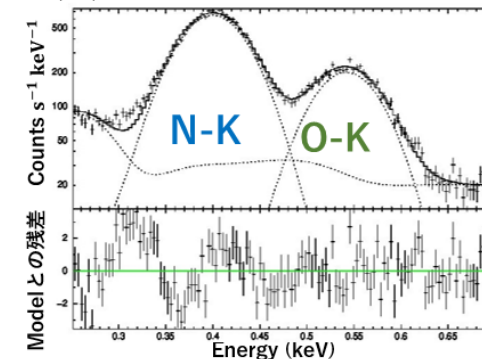
2014/07/04 192~216kmの窒素・酸素輝線スペクトル



2014/07/04 132~156kmの窒素・酸素輝線スペクトル



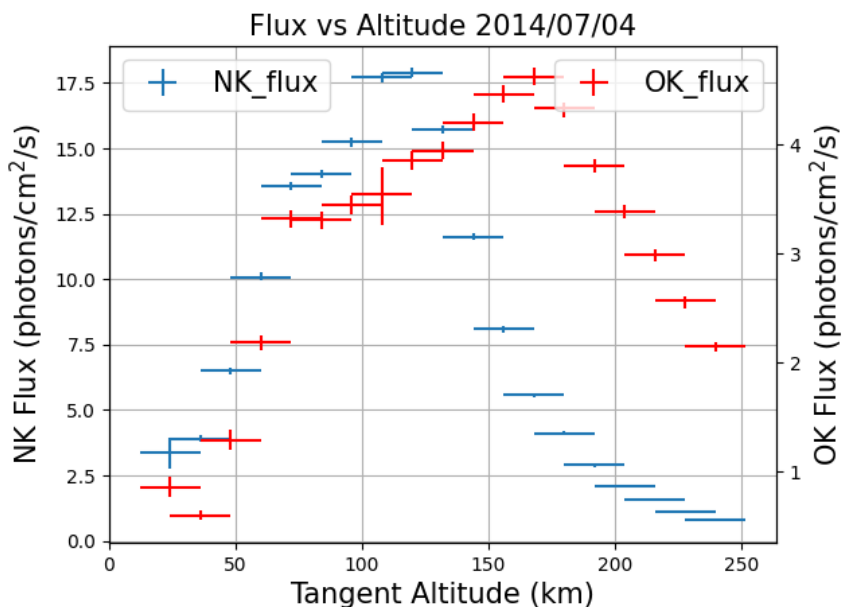
2014/07/04 72~96kmの窒素・酸素輝線スペクトル



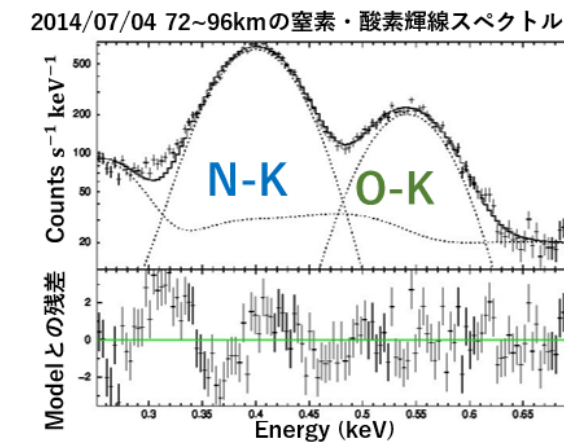
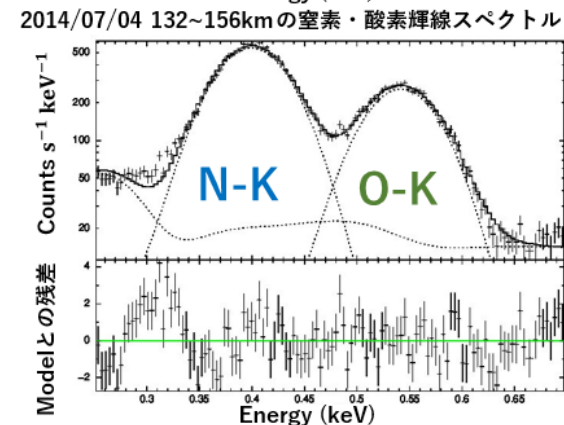
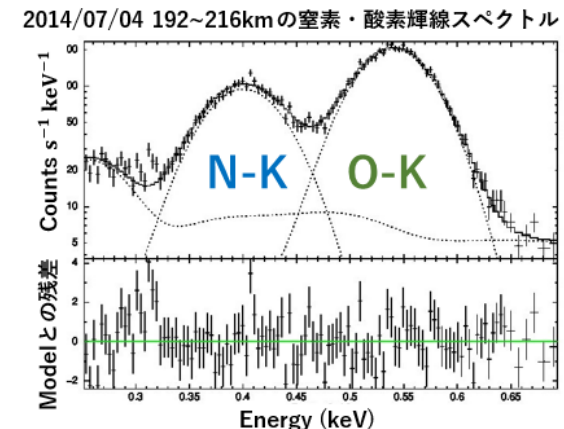
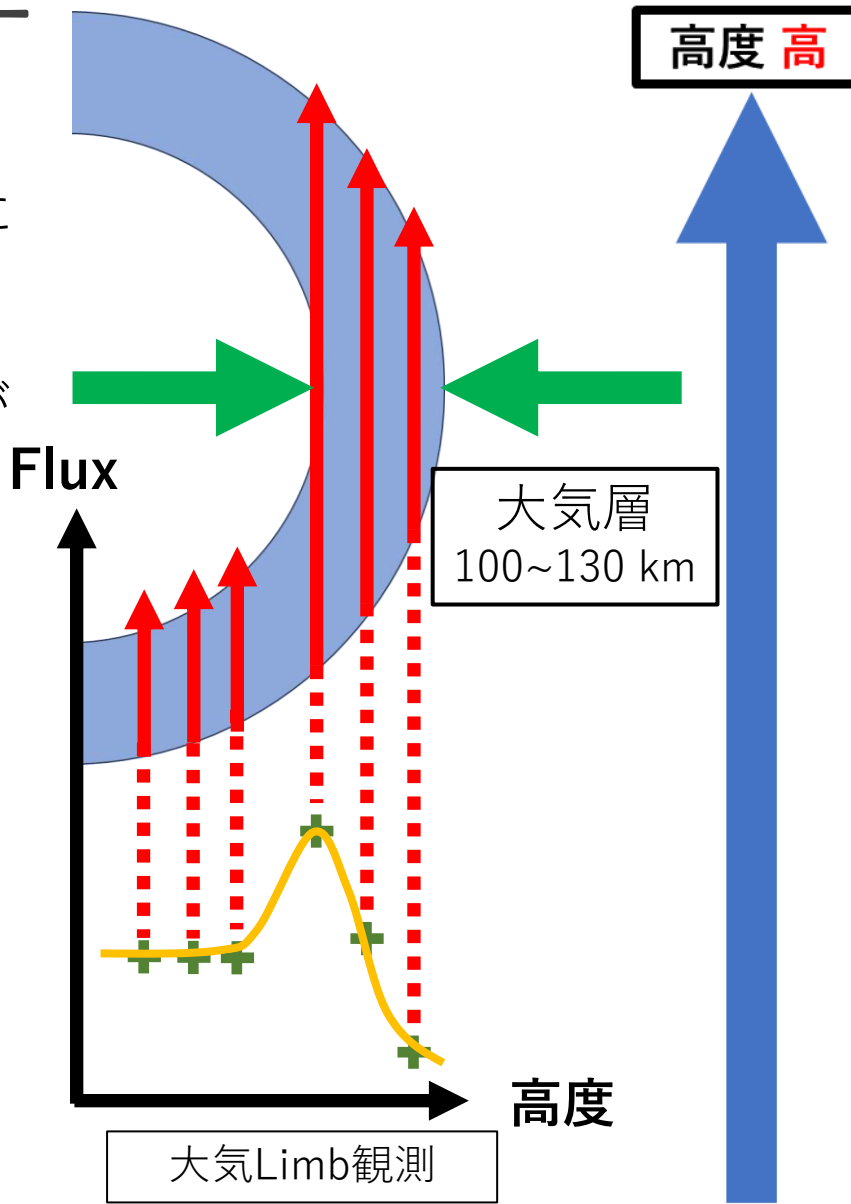


# Fluxの高度依存性

- ◆ 12 kmごとに切りとったスペクトルについてモデルフィッティングをそれぞれについて行い、得たFluxを横軸高度でプロット。
- ◆ 大気発光層の内円に接する高度がFluxがMAX



Fluxの高度依存性



# 中期変動・先行研究との比較

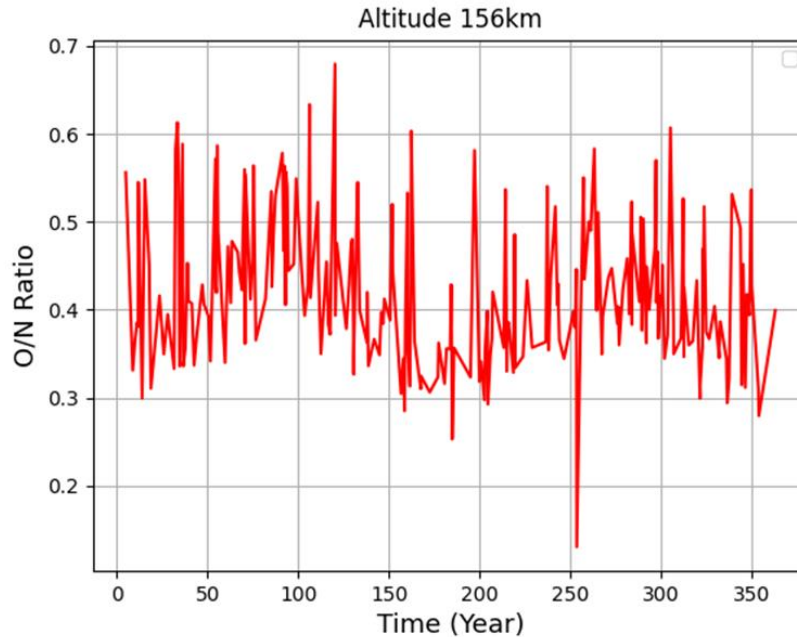
- ◆ Meier R. R., et al. (2015) & Lean et al. (2011) で高層大気の酸素/窒素比に季節依存性が見られることがわかっている
- ◆ 「すざく」観測データ(計238個)の環境を再現したNRLMSISモデルでも季節依存性が見られる
- ◆ 「すざく」でもこの傾向は見えるのか、MSISモデルの検証。

## NRLMSIS model

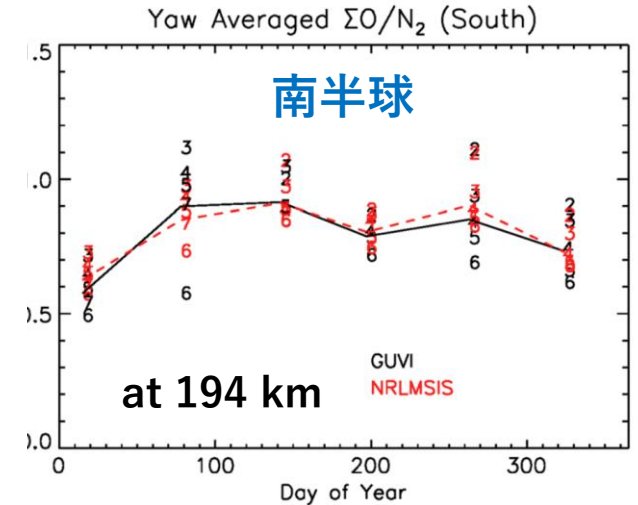
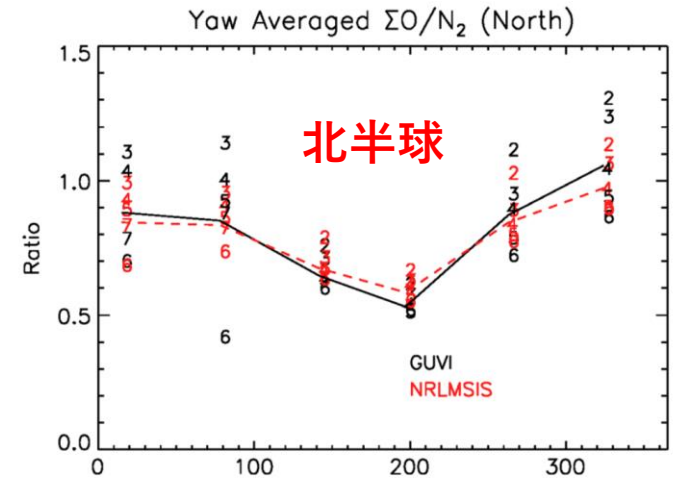
アメリカ海軍調査研究所による経験的大気モデル。年月日時刻、緯度、経度などの条件を指定することで、大気密度、組成比、温度などのデータを得ることができる。

$$RoC = \frac{data_i - data_0}{data_0}$$

$data_0$  : Day of Year minimum



「すざく」観測環境を再現したMSIS予測



熱圏電離圏中間圏エネルギー・力学衛星(TIMED)の遠紫外線(FUV)分光放射計(GUVI)での観測結果

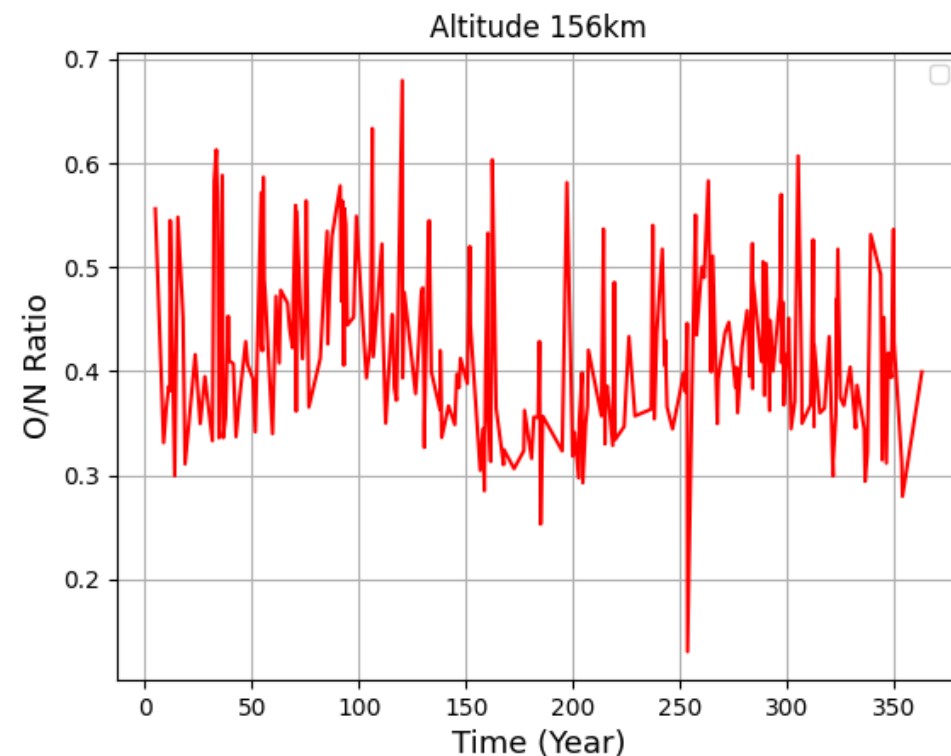
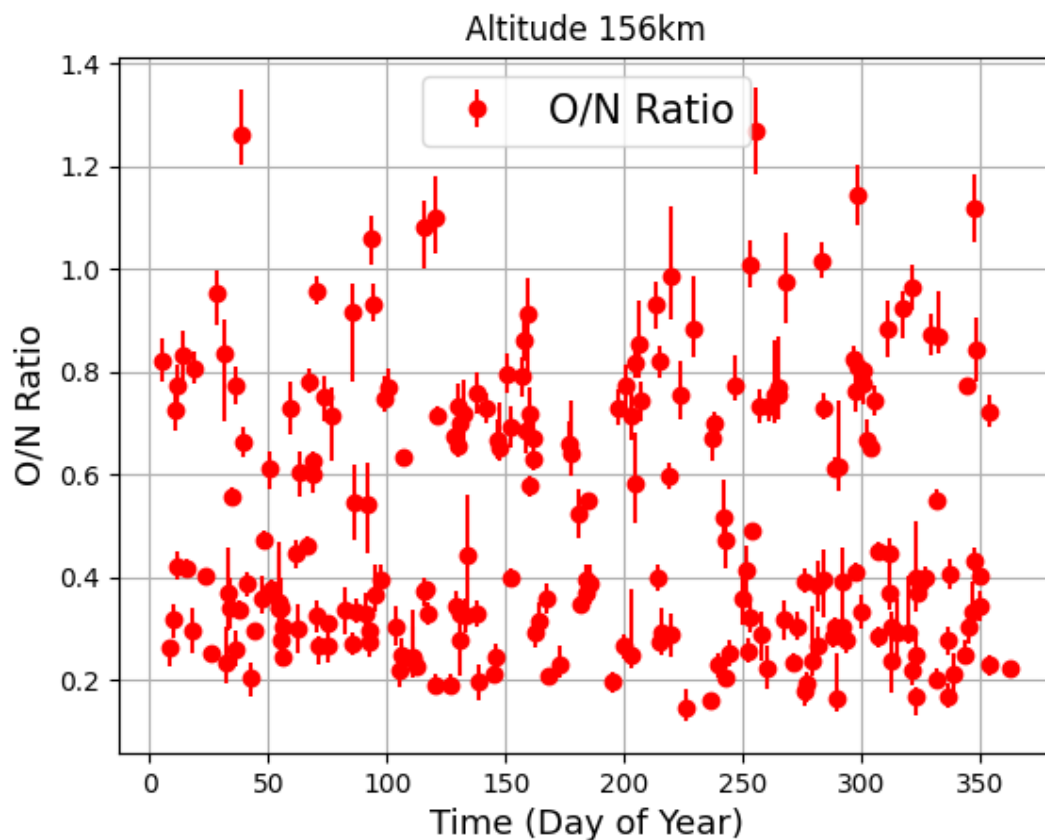
Meier R. R., et al. (2015)  
doi: 10.1002/2014EA000035

# 中期変動・先行研究との比較

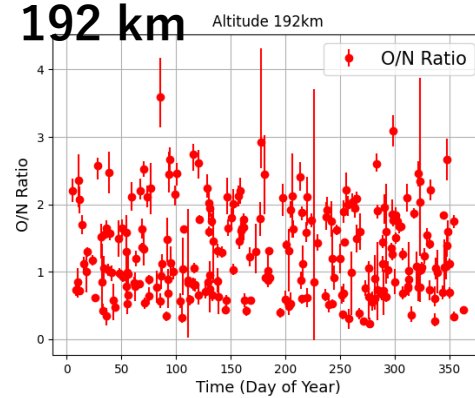
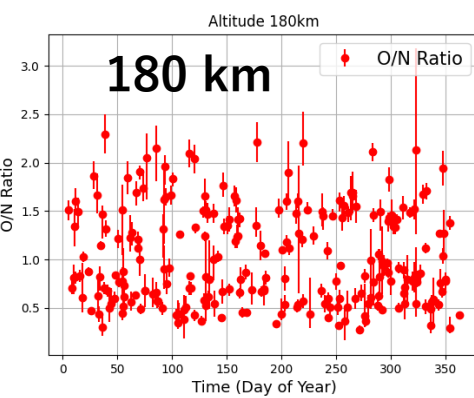
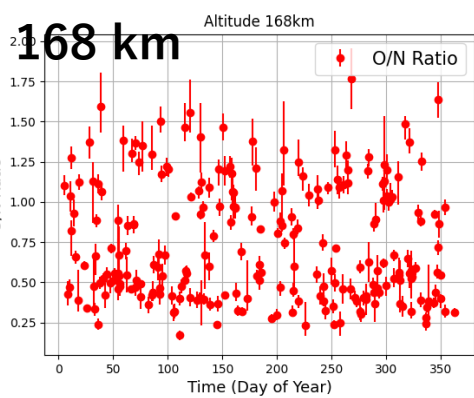
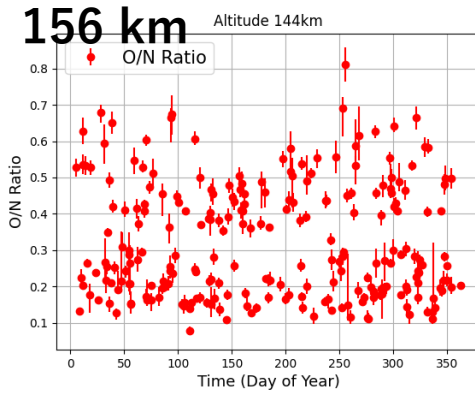
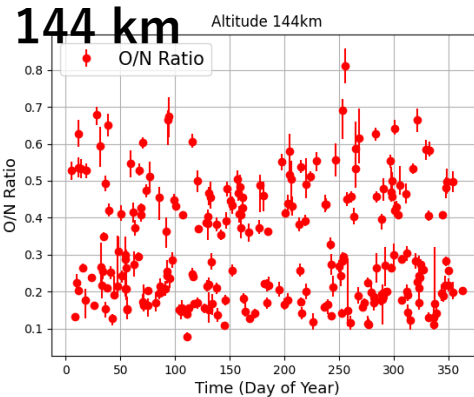
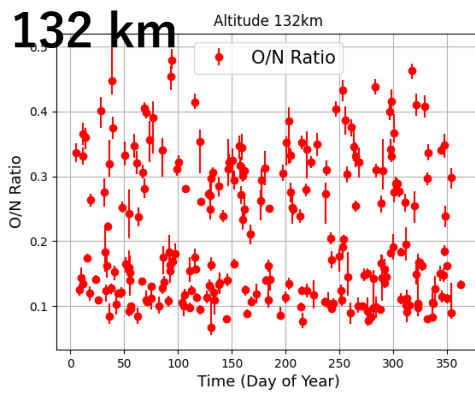
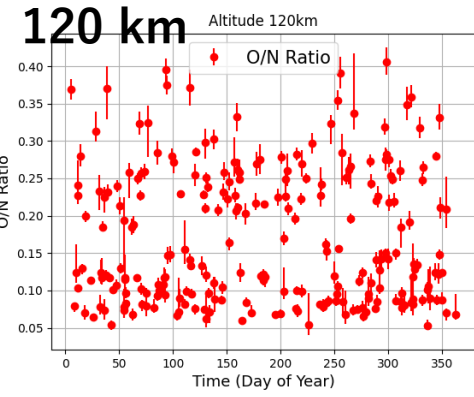
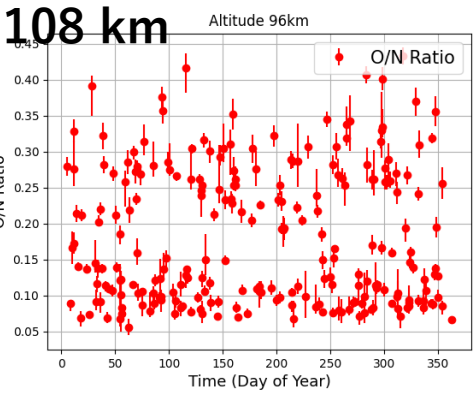
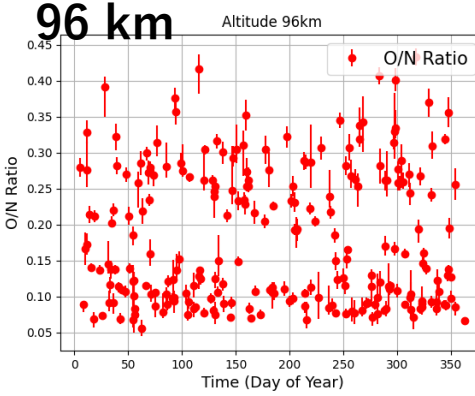
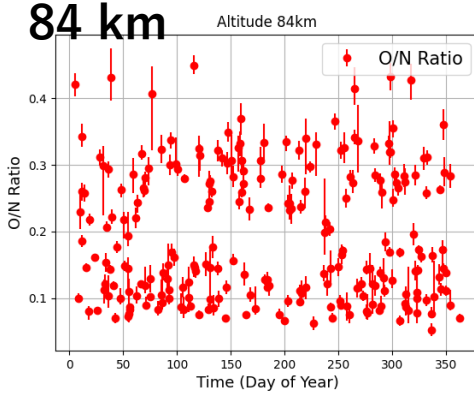
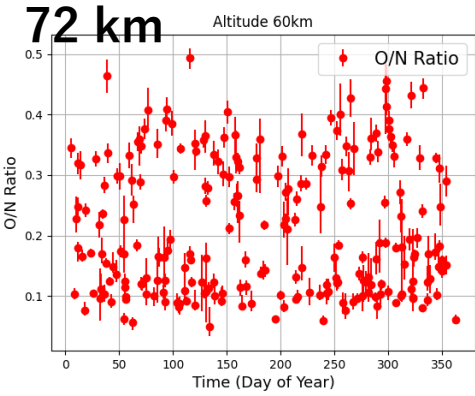
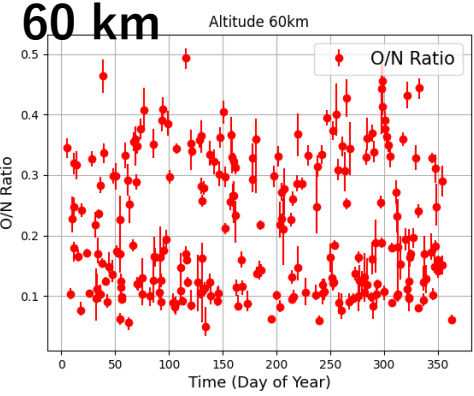
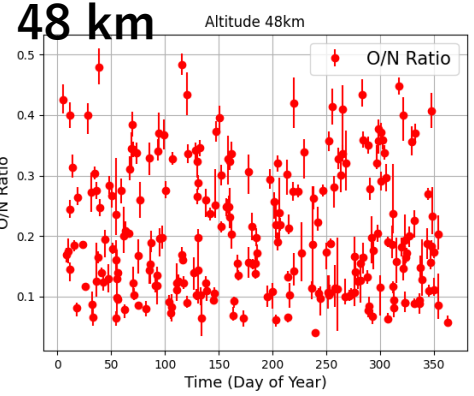
- ◆ データによって誤差を超えて大きくバラつき、MSIS予測のようなO/N比の季節依存性は見られなかった。

$$RoC = \frac{data_i - data_0}{data_0}$$

$data_0$  : Day of Year minimum



「すぎく」観測環境を再現した  
MSIS予測



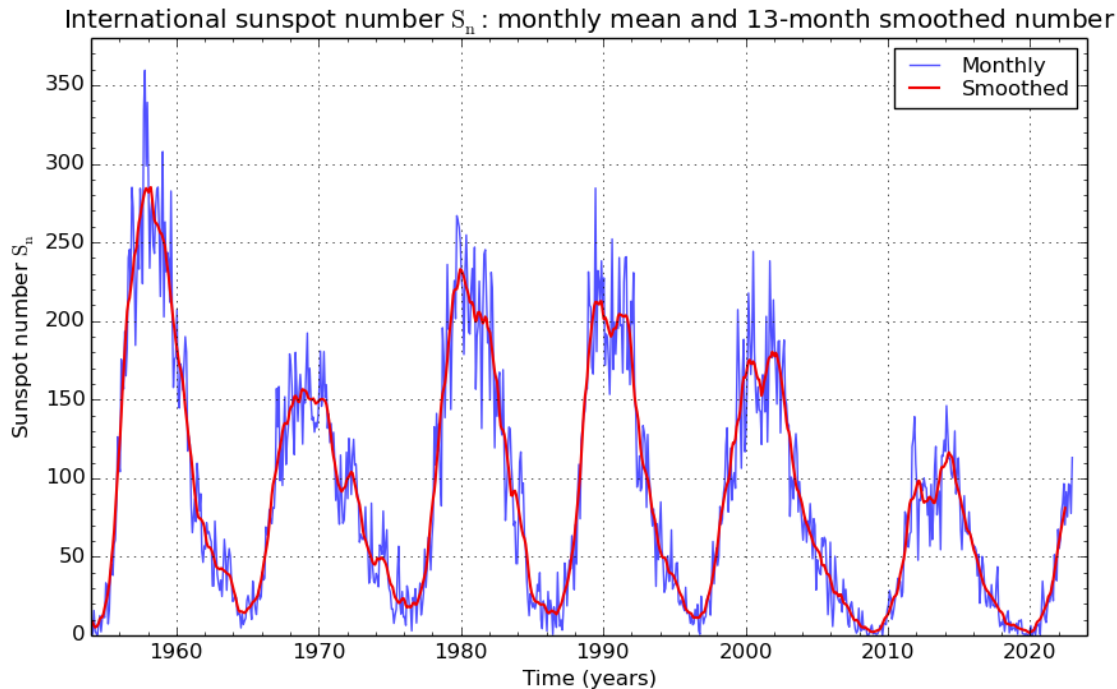
全ての高度でのO/N比の中期変動

# 長期変動：太陽活動の11年周期

- ◆ 太陽フレアや黒点相対数、F10.7 (太陽からの波長 10.7 cmの電波の強度)は、**平均11年の周期性**をもつ。

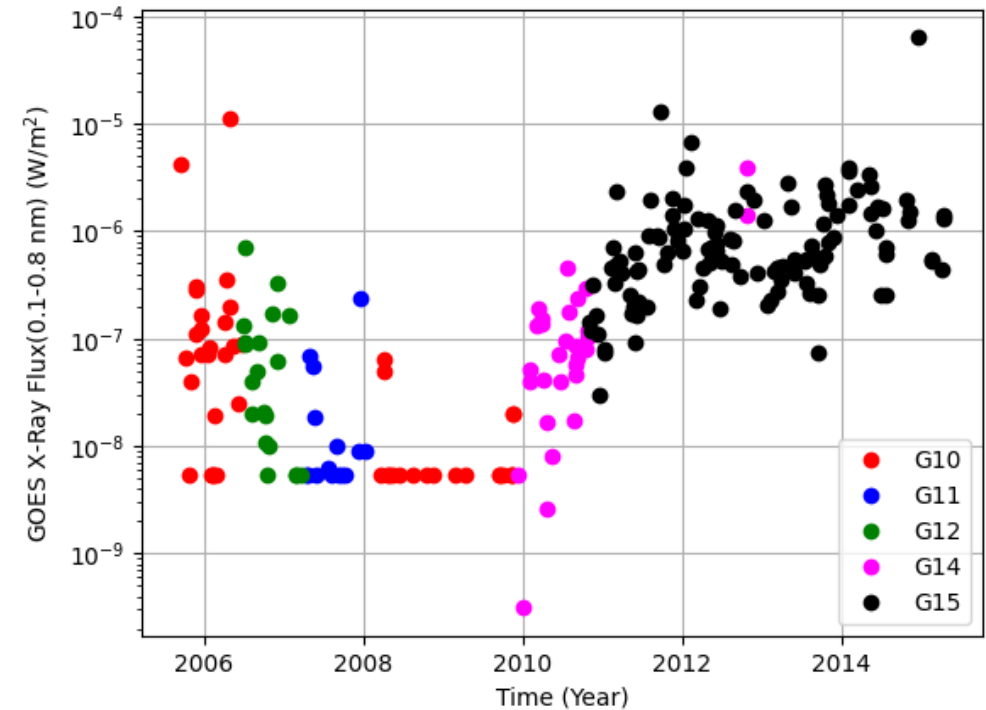
- ◆ NOAA/NASAのGOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 気象観測衛星が観測した**太陽X線Flux**(波長：0.1-0.8 nm) を太陽活動の指標とする。  
<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes-r.html>

太陽黒点相対数の変動



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2023 January 1

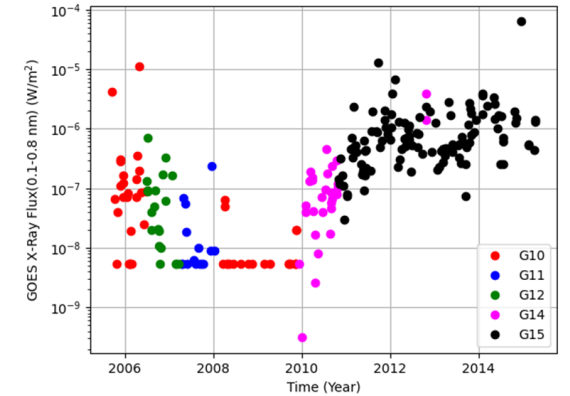
太陽X線Fluxの10年変動(GOES衛星)



# 長期変動：太陽X線との相関

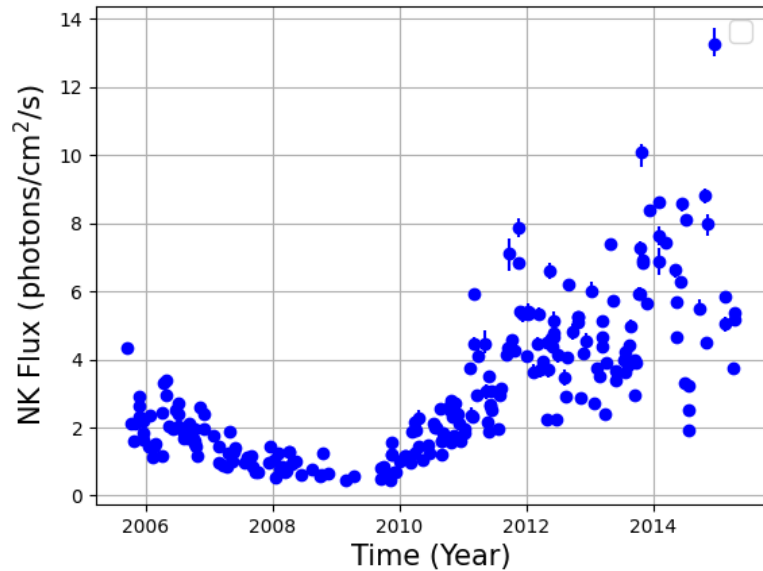
- ◆ 縦軸に窒素・酸素それぞれのFluxとO/N比を、横軸にTime(Year)でプロット。
- ◆ 入射X線が増えれば反射X線(酸素・窒素Flux)も増える。
- ◆ **O/N比も相関している!?**

太陽X線Fluxの10年変動



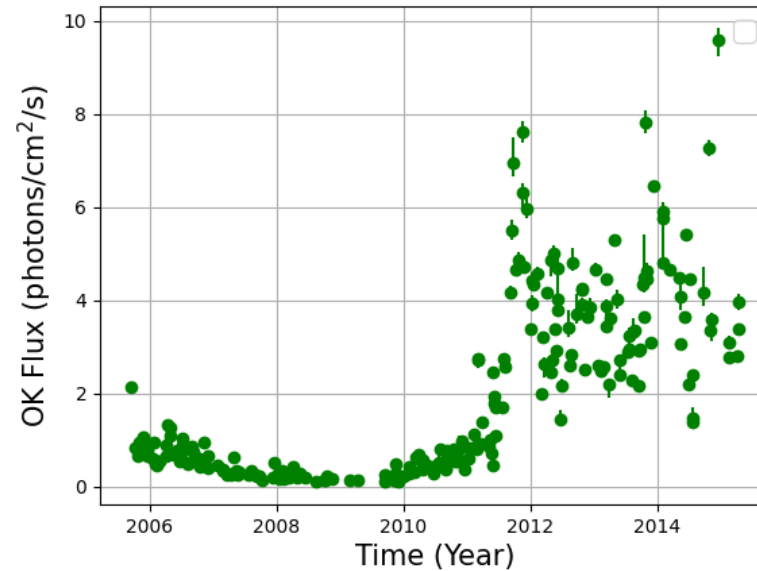
窒素Flux

Altitude 156km



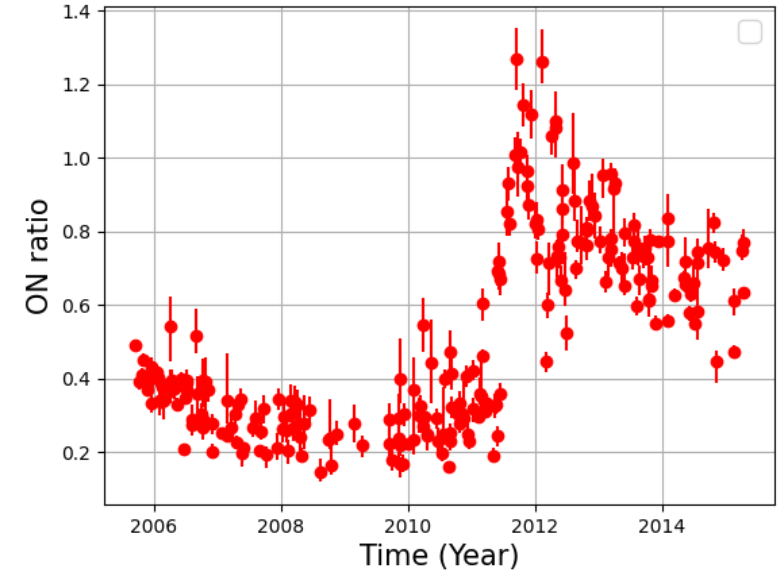
酸素Flux

Altitude 156km



O/N Ratio

Altitude 156km



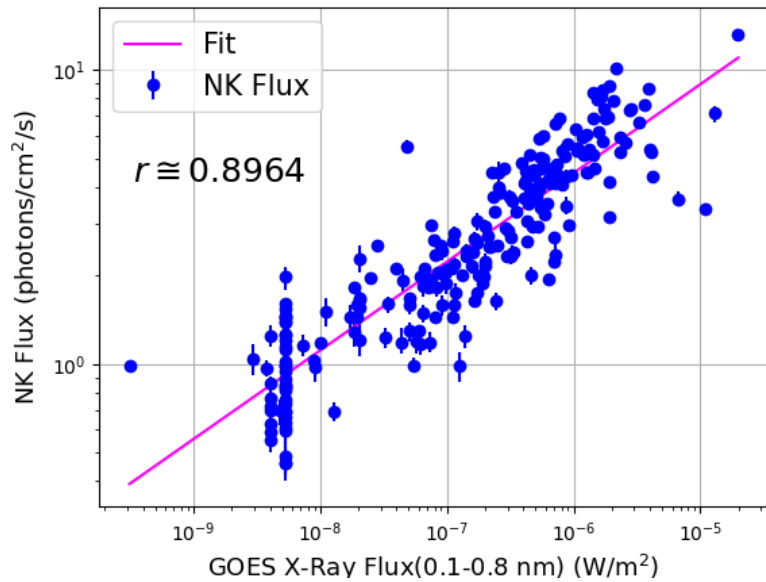
# 長期変動：太陽X線との相関

- ◆ 縦軸に窒素・酸素それぞれのFluxとO/N比を、横軸にTime(Year)でプロット。
- ◆ 入射X線が増えれば反射X線(酸素・窒素Flux)も増える。
- ◆ **O/N比も相関している！？**

相関係数 $r$ の絶対値	目安
$0.0 \leq  r  < 0.2$	相関がない
$0.2 \leq  r  < 0.4$	弱い相関がある
$0.4 \leq  r  < 0.7$	やや相関がある
$0.7 \leq  r  < 1.0$	強い相関がある

## 窒素Flux

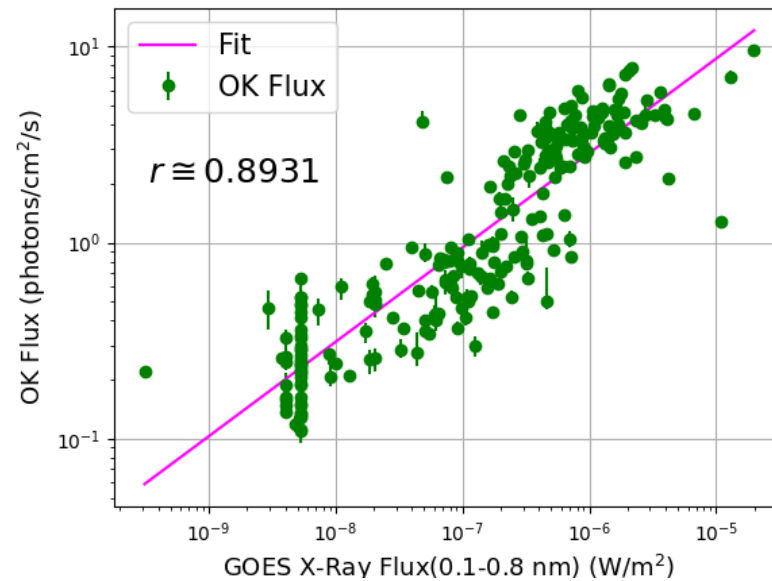
Altitude 156km



2023/6/30

## 酸素Flux

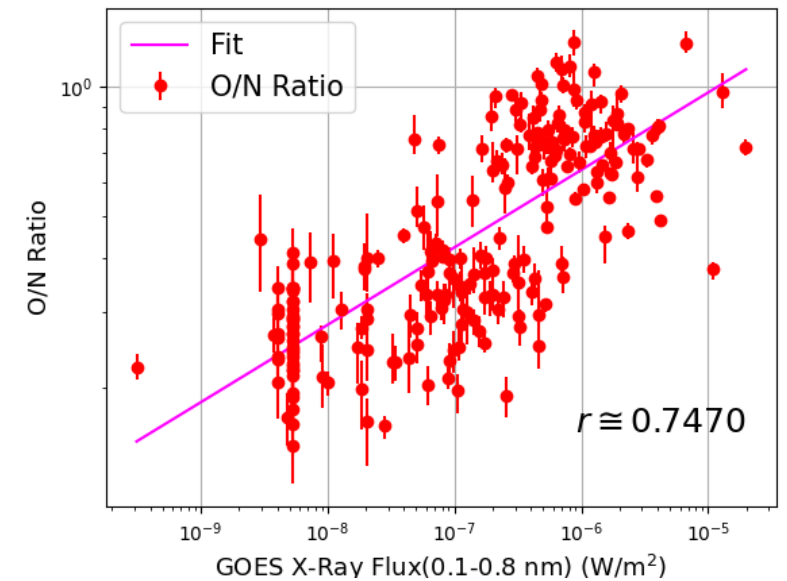
Altitude 156km



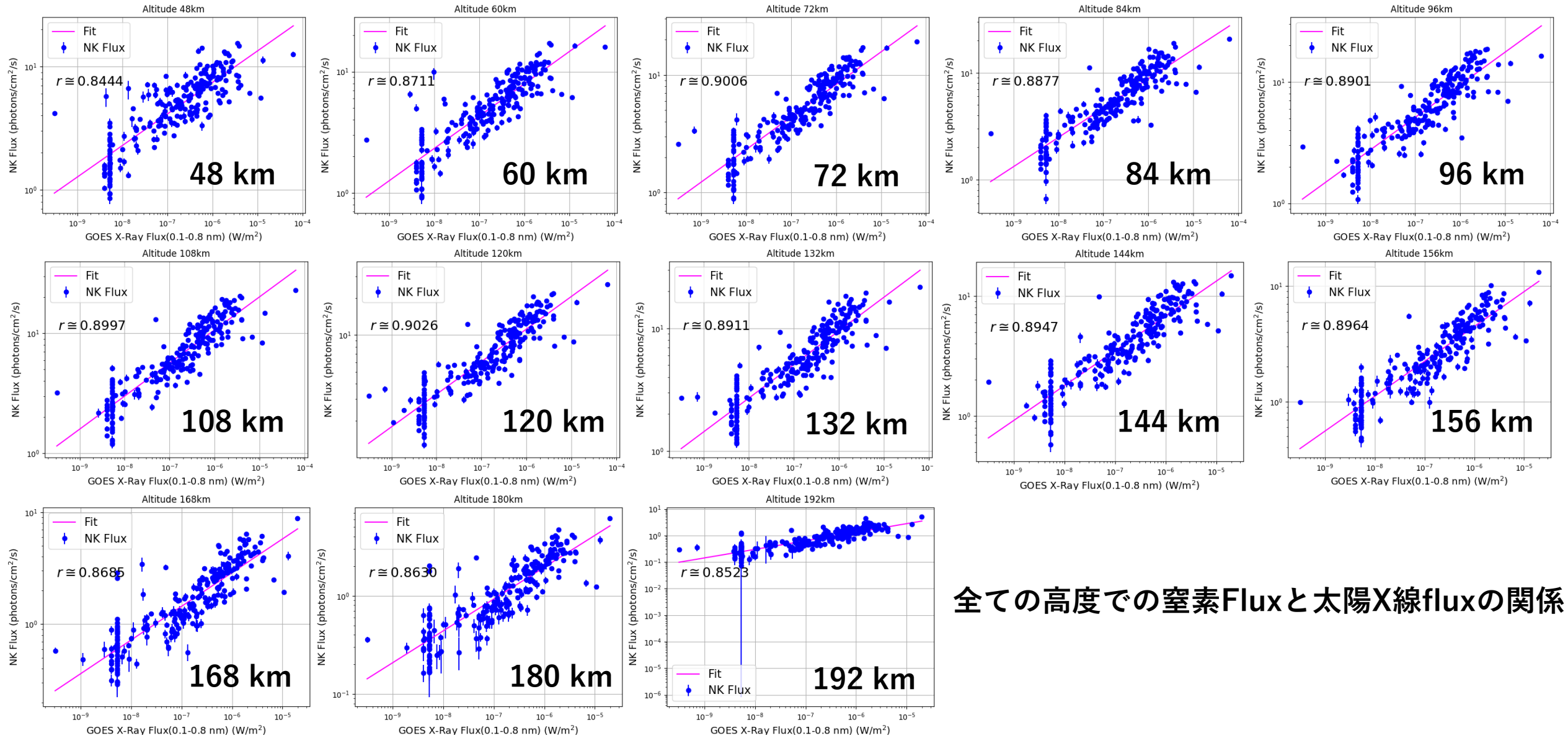
宇宙物理と超高層大気物理の融合研究会

## O/N Ratio

Altitude 156km

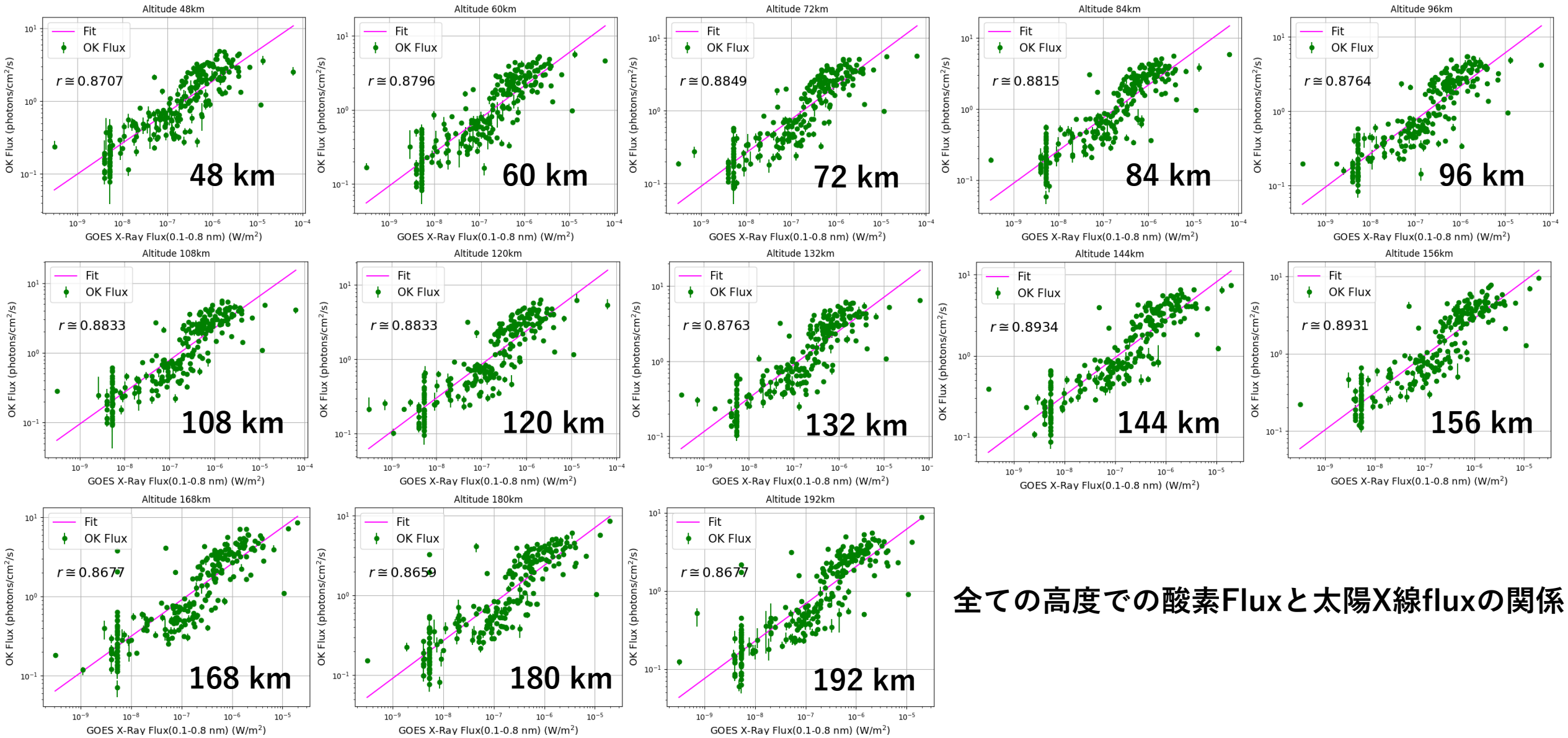


15

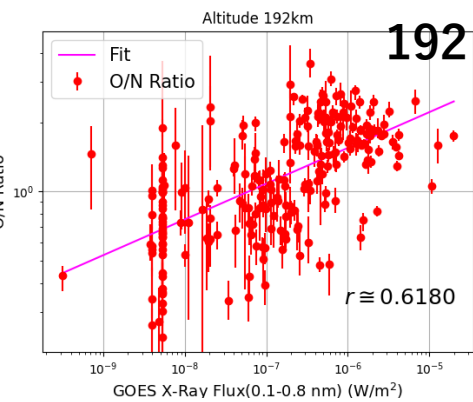
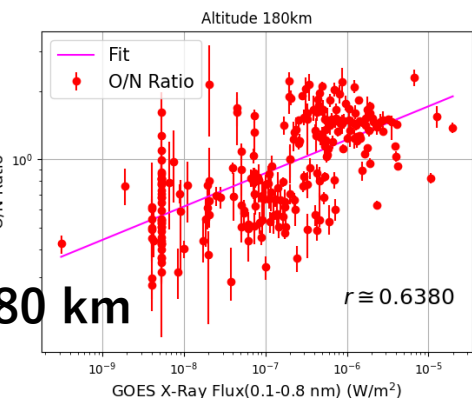
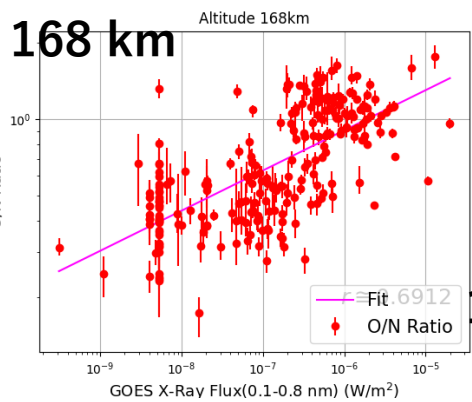
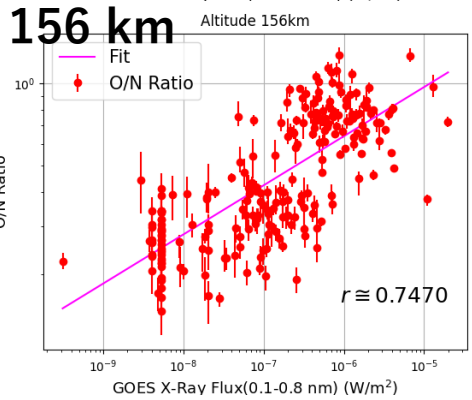
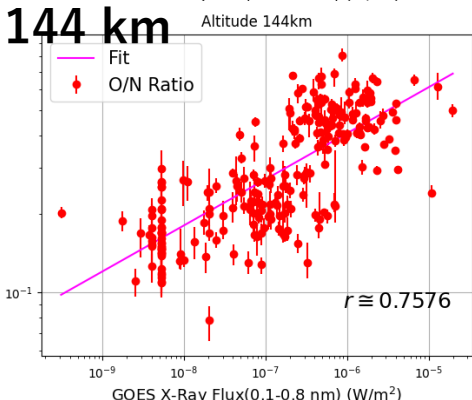
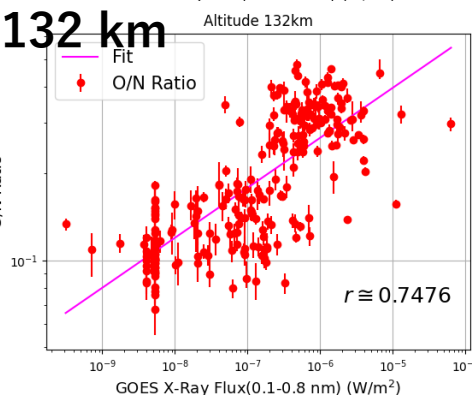
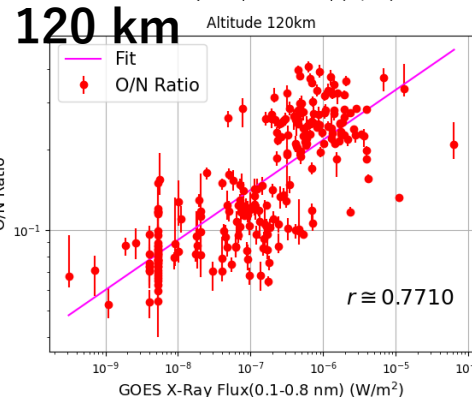
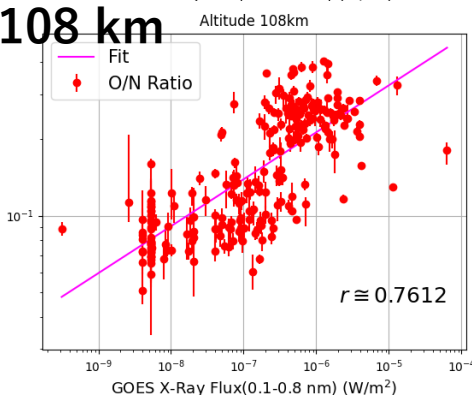
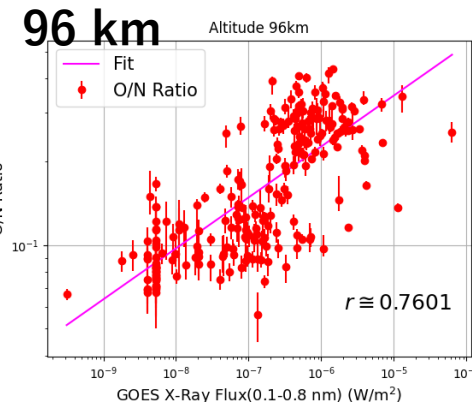
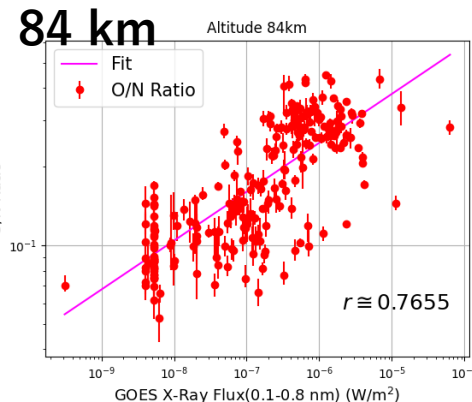
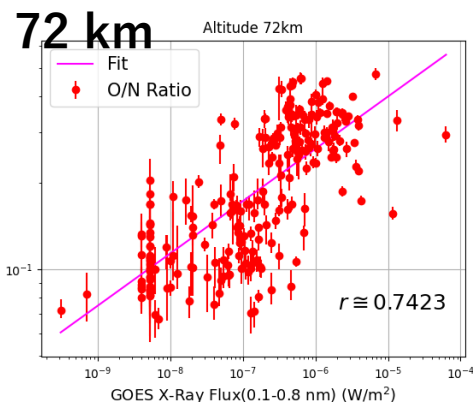
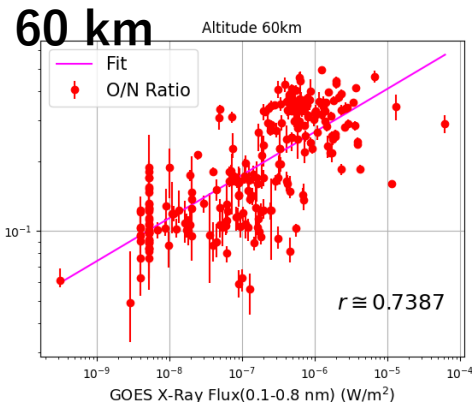
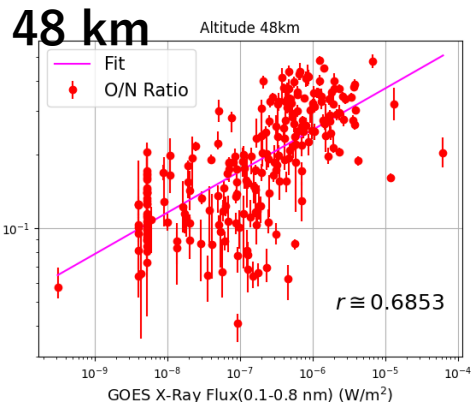


全ての高度での窒素Fluxと太陽X線fluxの関係





全ての高度での酸素Fluxと太陽X線fluxの関係



全ての高度でのO/N比と太陽X線fluxの関係

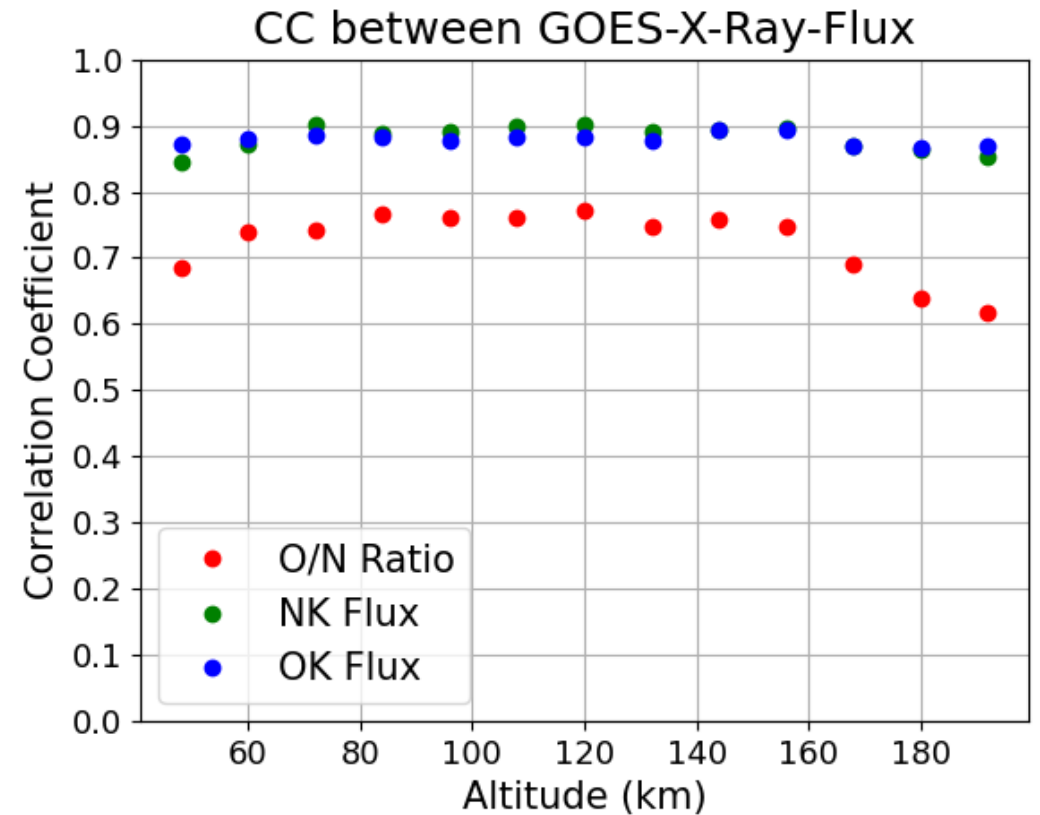
# 長期変動：太陽X線との相関

- ◆ FluxとO/N比について、太陽X線Fluxとの相関係数を高度毎に算出。
- ◆ Flux、O/N比ともに太陽X線Fluxと正の相関がある。

太陽活動が活発になると超高層大気のO/N比が大きくなった！？

- ◆ 高度による差異(どの高度まで太陽X線の影響を受けるか)はあまり見られない

相関係数 $r$ の絶対値	目安
$0.0 \leq  r  < 0.2$	相関がない
$0.2 \leq  r  < 0.4$	弱い相関がある
$0.4 \leq  r  < 0.7$	やや相関がある
$0.7 \leq  r  < 1.0$	強い相関がある

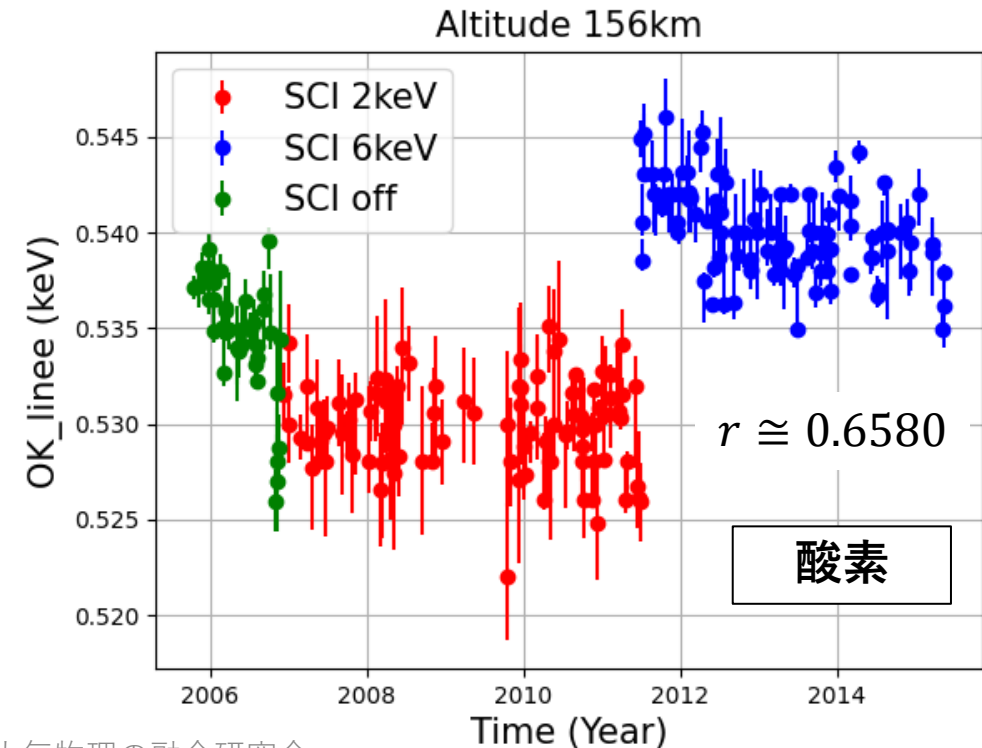
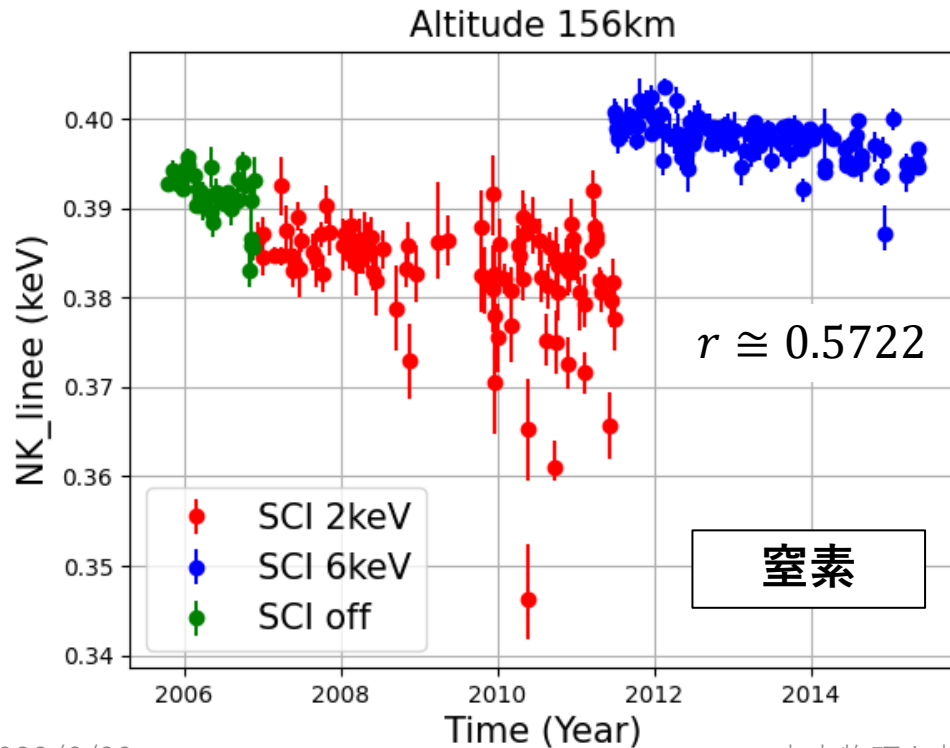


# 「すざく」 SCIモードチェンジの影響？

- ◆ 太陽X線Fluxと輝線中心の相関係数を求めると相関が出るが、輝線中心はSCIモードに大きく影響を受けるパラメータ。
- ◆ Fluxと違い、O/N比と太陽活動がリンクしている説明が困難

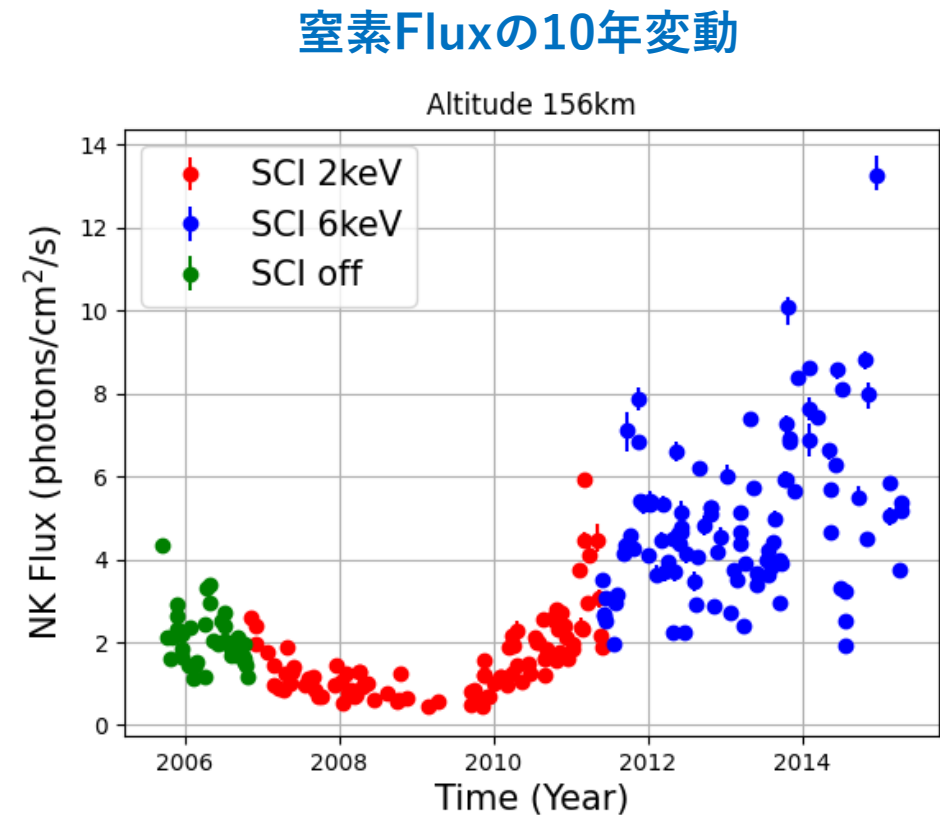
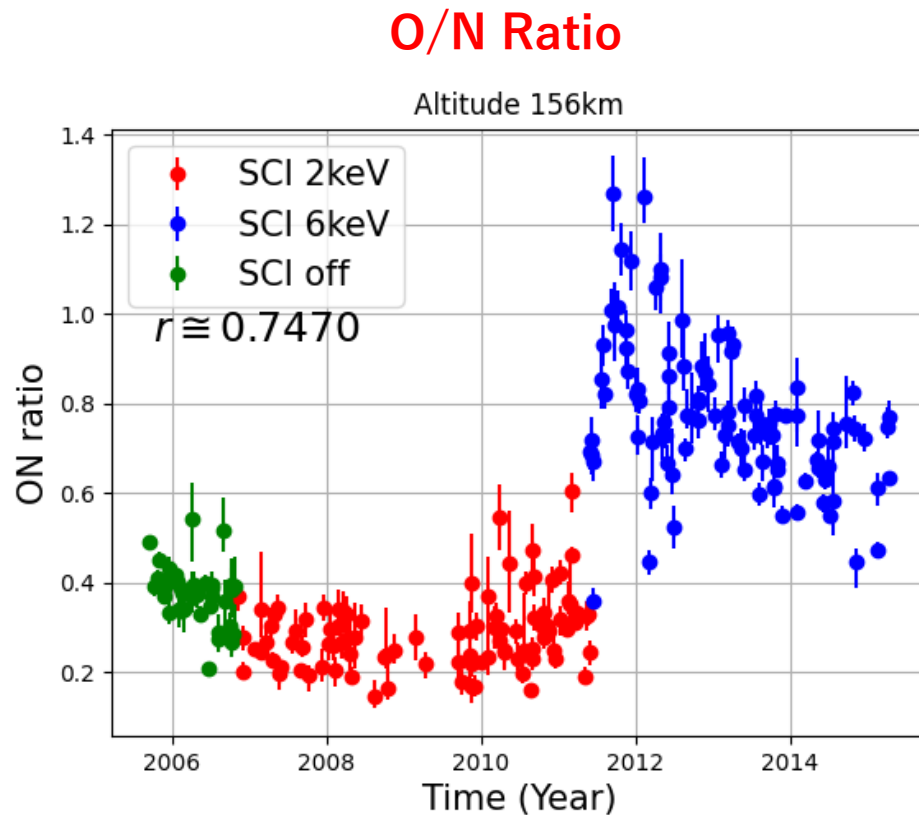
⇒ O/N比もSCIモードチェンジの影響を受けている可能性あり？

XIS1のSCI ON時期  
SCI ON 2 keV : 2006年11月  
SCI ON 6 keV : 2011年6月



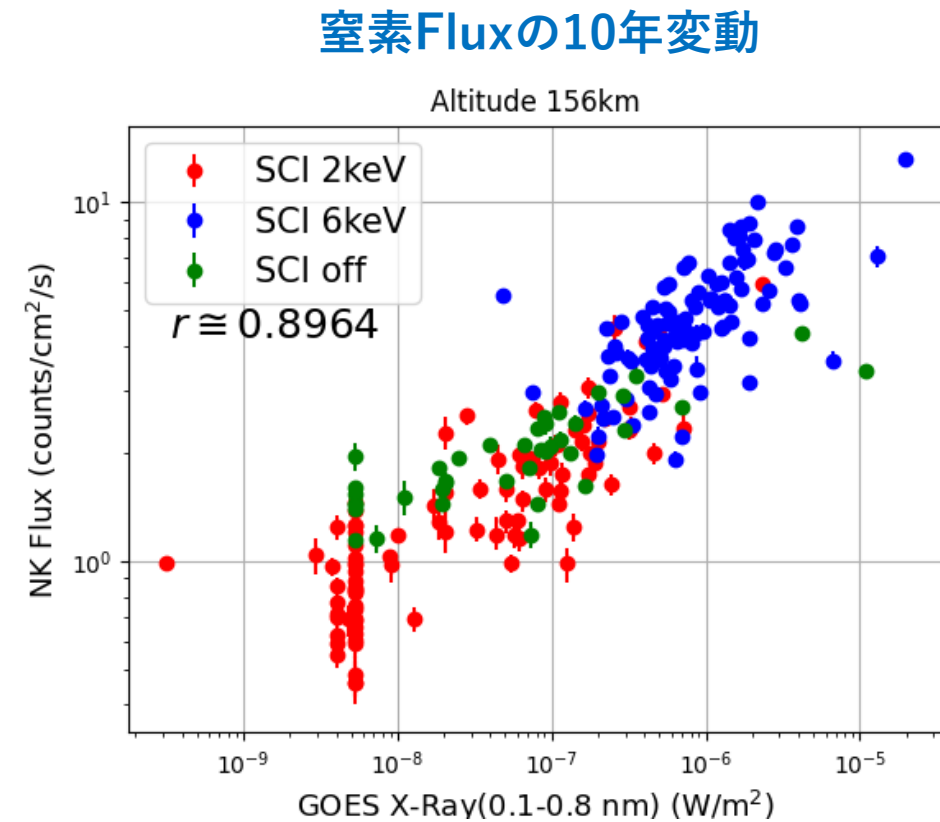
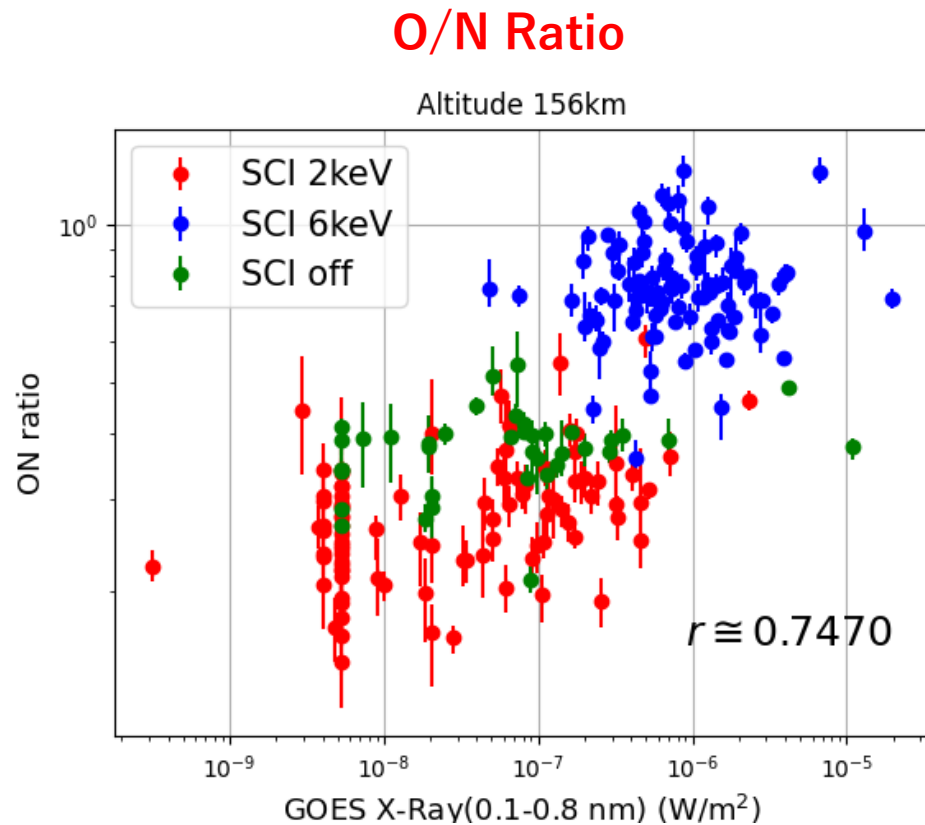
# 「すざく」SCIモードチェンジの影響？

- ◆ Fluxは連続的ではある。
- ◆ O/N比は相関のないクラスターが3つ重なっているだけに見える。



# 「すざく」 SCIモードチェンジの影響？

- ◆ Fluxは連続的ではある。
- ◆ O/N比は相関のないクラスターが3つ重なっているだけに見える。

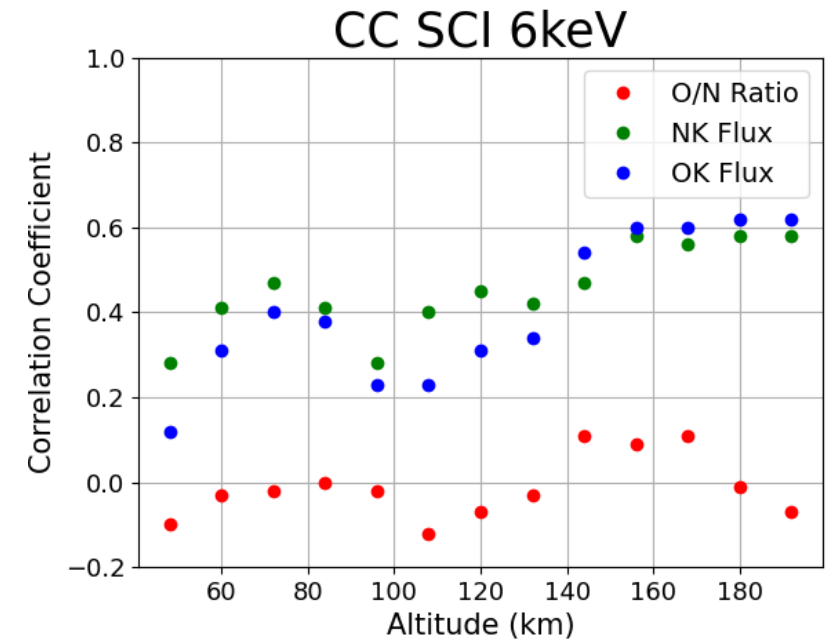
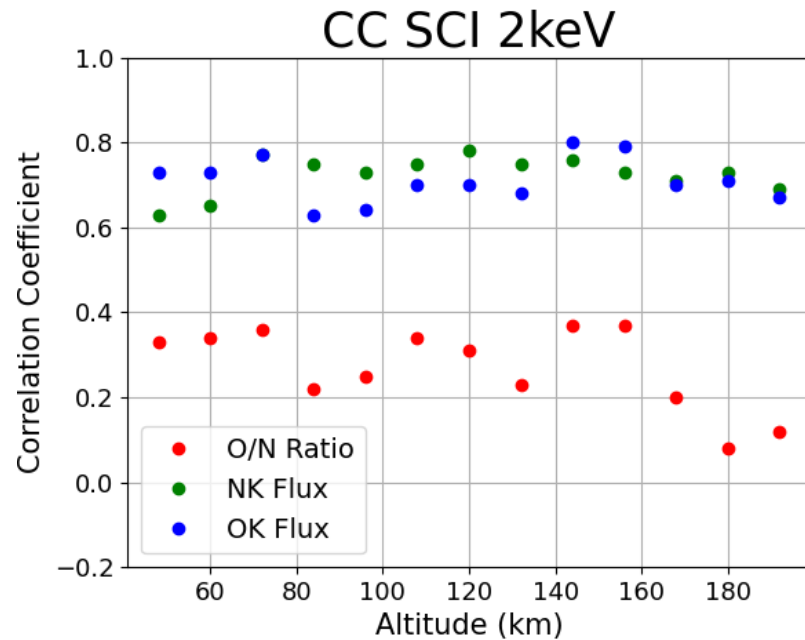
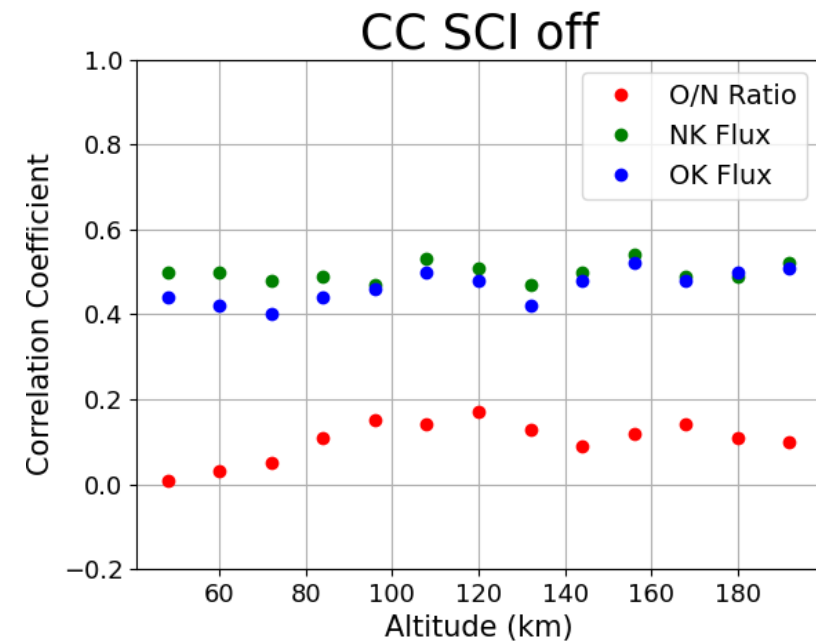


# SCI毎の太陽X線Fluxと各パラメータの相関

- SCIモード毎に各パラメータと太陽X線Fluxの相関係数を算出
- どのSCIモードでも相関はない

⇒やはりSCIモードの影響か・・・

相関係数 $r$ の絶対値	目安
$0.0 \leq  r  < 0.2$	相関がない
$0.2 \leq  r  < 0.4$	弱い相関がある
$0.4 \leq  r  < 0.7$	やや相関がある
$0.7 \leq  r  < 1.0$	強い相関がある

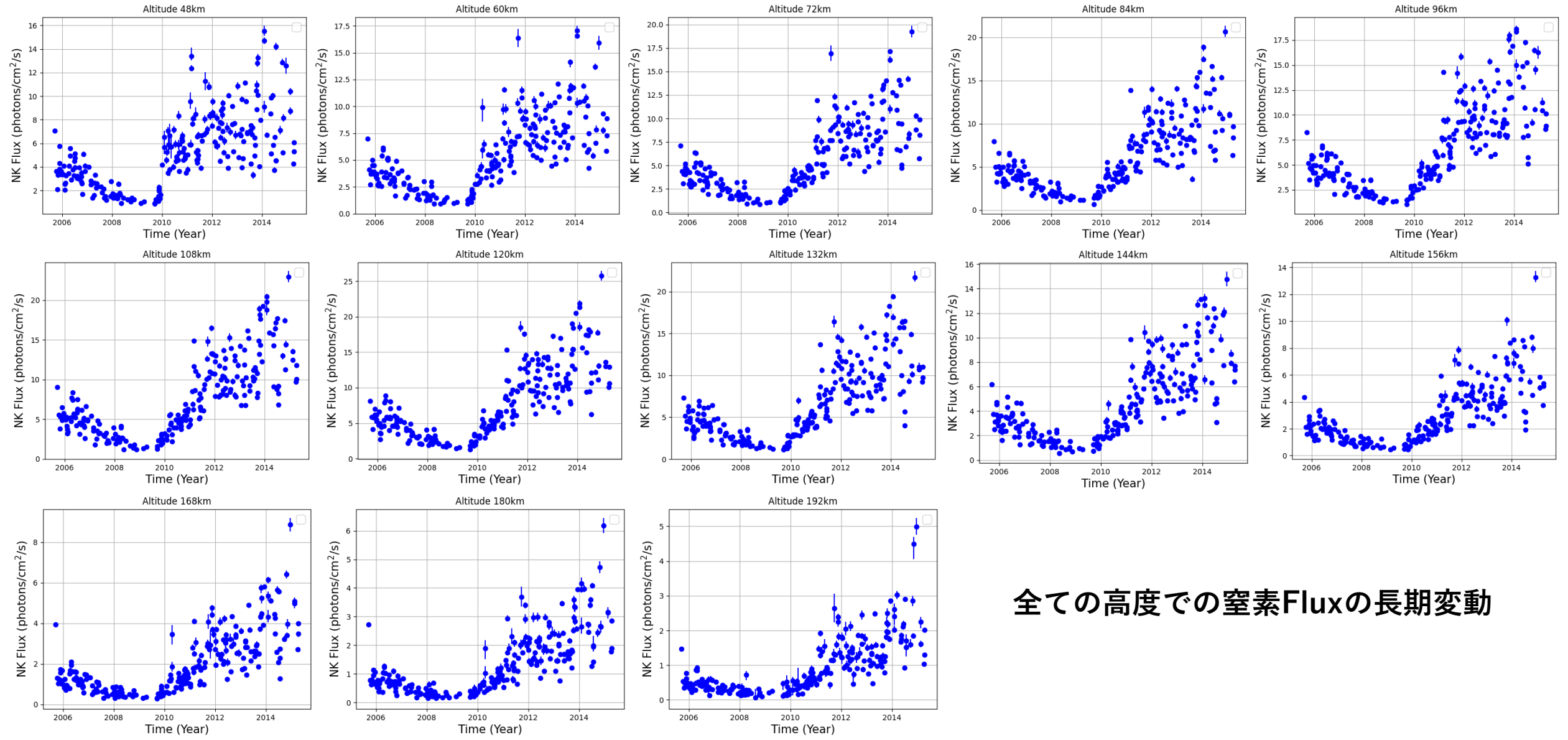


# まとめ

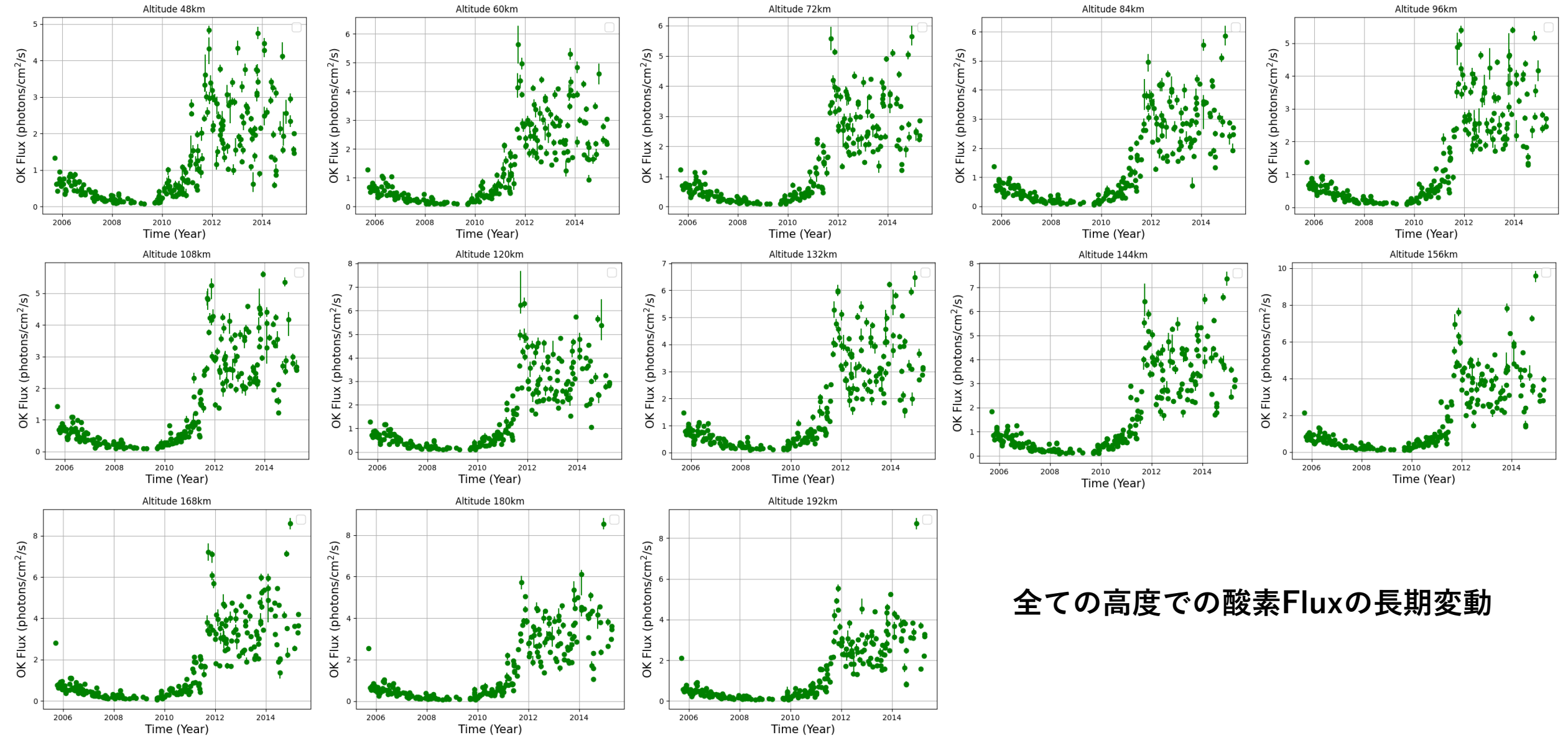
- ◆ X線天文衛星「すざく」 昼地球観測データを用いて、窒素・酸素蛍光X線から **超高層大気の中・長期変動**を調査した。
- ◆ 結果：
  - ◆ 中期(季節)変動：
    - ◆ データのバラつきが大きく、O/N比の季節依存性は先行研究とも一致せず特徴的な振る舞いは見られず。
  - ◆ 長期(10年)変動：
    - ◆ 太陽X線Fluxと窒素・酸素Fluxは強く相関している。
    - ◆ 高度約 60 km~160 kmでO/N比が、**太陽X線Flux**と**強い正の相関**を見せた。
    - ◆ しかし、輝線中心のようにO/N比は**SCIモードの影響**を受けている**可能性大**
- ◆ 今後の展望  
今回の解析で得たO/N比の長期変動の原因の究明に努める(SCI or 太陽活動?)。



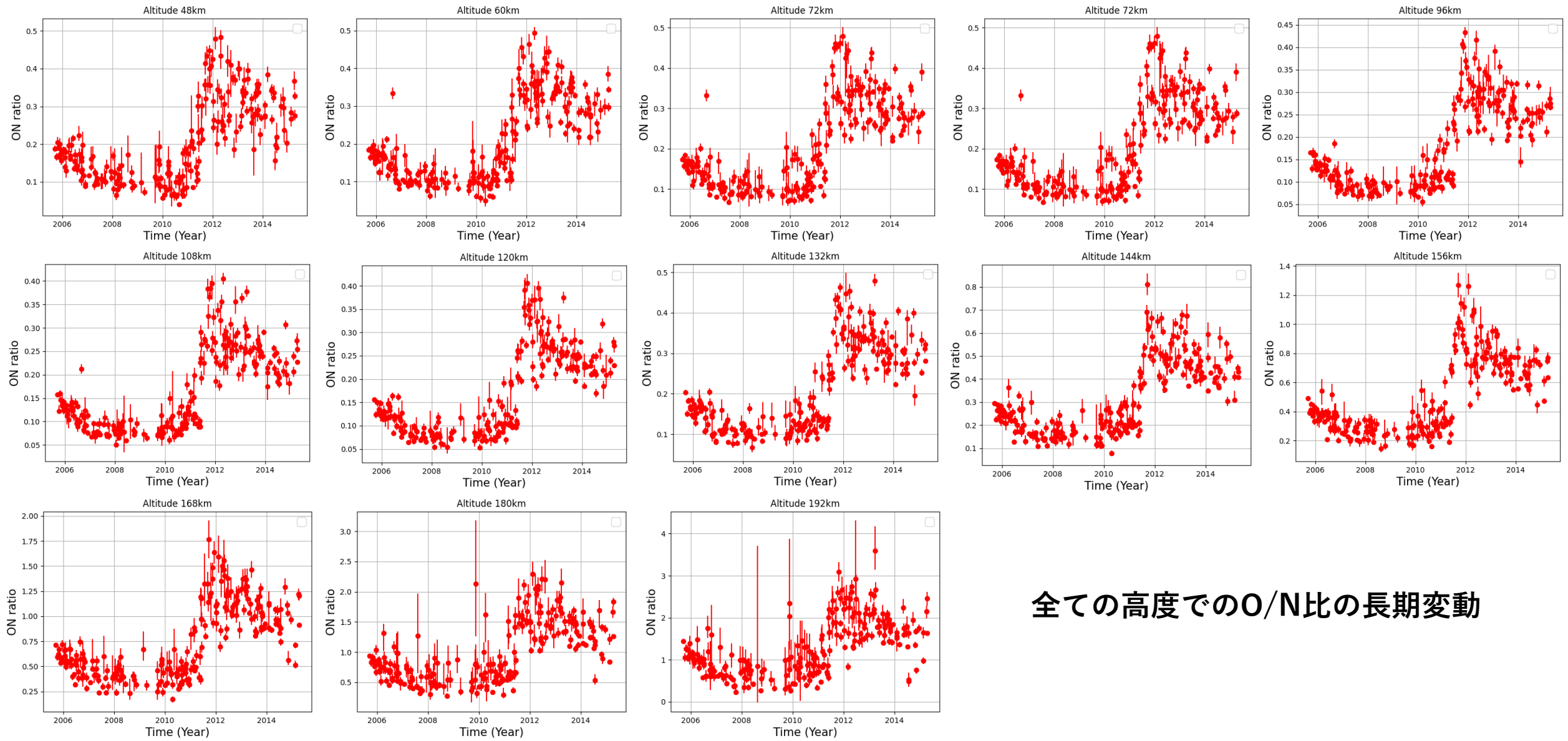
# BackUp



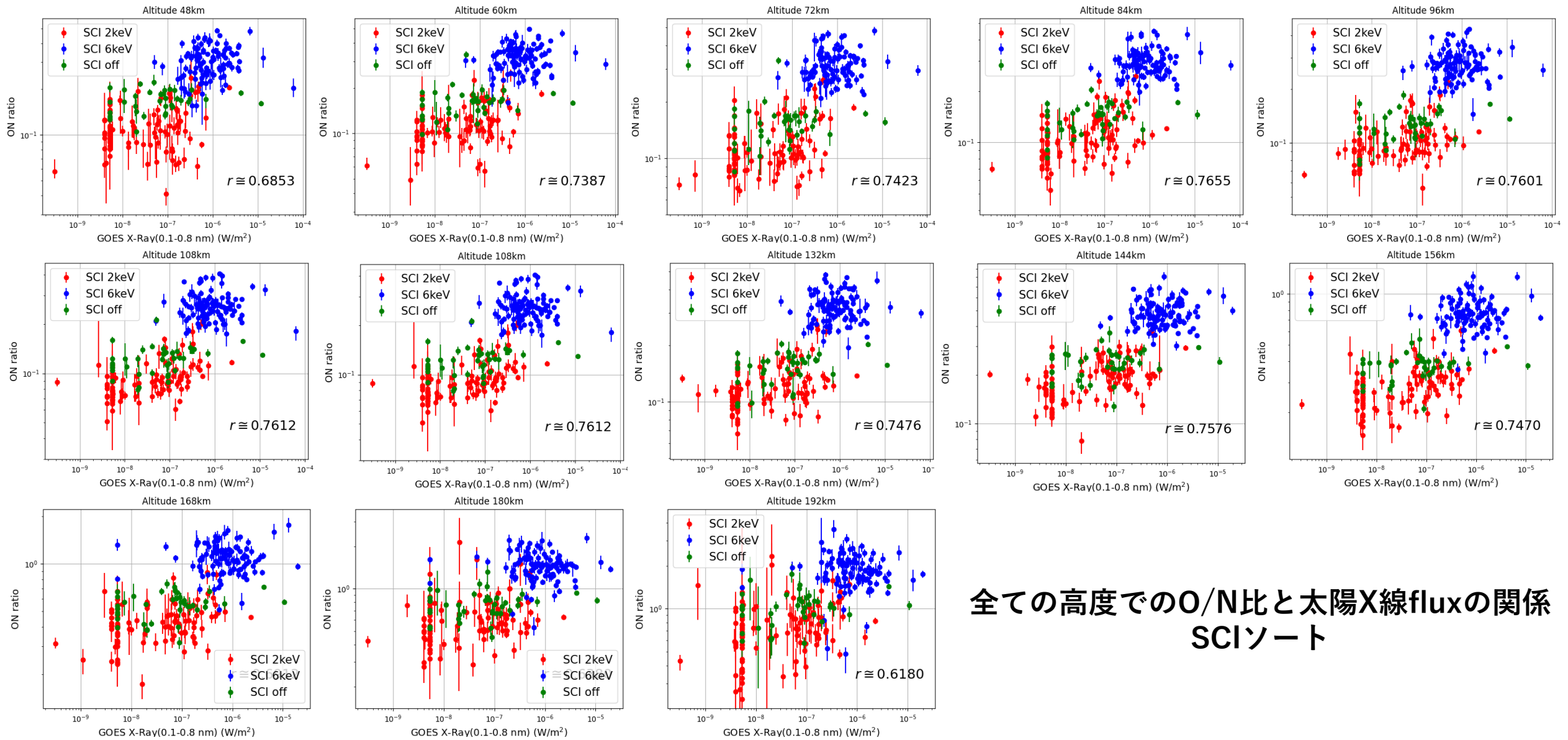
## 全ての高度での窒素Fluxの長期変動



全ての高度での酸素Fluxの長期変動



全ての高度でのO/N比の長期変動



## 全ての高度でのO/N比と太陽X線fluxの関係 SCIソート