

太陽研究最前線ツアー2023 宇宙科学研究所 データ解析実習

2023年3月28日

鳥海 森 (JAXA 宇宙科学研究所)

1. はじめに

このデータ解析実習では、太陽観測衛星「ひので」や NASA の SDO 衛星・IRIS 衛星などによる太陽観測データを、解析マシンに読み込み、初歩的なプロットできるようになることを目指します。

本実習ではデータ解析用プログラミング言語 IDL (Interactive Data Language) を用いた例を示します。IDL には太陽データ解析用ライブラリである Solar Software (SSW) が用意されています。

近年では SSW のプロシージャ群が Python に多く移植されています (SunPy)。Python を使った解析については、3/30(木)に飯田さん (新潟大学) の実習で取り上げます。

2. 準備

はじめに、Mac のターミナルを起動し、適当な作業ディレクトリを作成します。

```
$ mkdir work/
```

作成したディレクトリに入り、SSWidl を起動します。

```
$ cd work/
```

```
$ sswidl
```

しばらくすると、コマンドプロンプトが現れます。

```
IDL>
```

IDL を終了するには、`exit` を入力します。

```
IDL> exit
```

これ以降は、3、4、5 から好きな課題を選んで進めます。いずれも 2014 年 10 月に出現した巨大黒点 NOAA 12192 の観測データです。

~~データは以下の Google ドライブの各フォルダにあります。~~ いずれも太陽物理学で広く使われる FITS (Flexible Image Transport System) 形式です。

3. 磁場データ

「ひので」の可視光磁場望遠鏡 (SOT: Solar Optical Telescope) や SDO 衛星の HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) が太陽表面のベクトル磁場データを取得しています。Google ドライブの data_mag からデータをダウンロードし、2.で作成した作業ディレクトリに置きます。

はじめに SSWidl を起動し、SOT のベクトル磁場データ¹を読み込みます。

```
$ sswidl
IDL> file_sot='20141024_021005_L2.1.fits'
IDL> data_sot_bp=readfits(file_sot,ext=2)
IDL> data_sot_bt=readfits(file_sot,ext=3)
IDL> data_sot_br=readfits(file_sot,ext=4)
```

この FITS データには、SOT の取得した偏光データをインバージョンして得られた 2 次元の磁場データが格納されています。このうち、ext=2 は磁場の東西成分、ext=3 は南北成分、ext=4 は動径方向成分です。

例えば、動径方向成分をプロットするには、

```
IDL> plot_image,data_sot_br>(-1000)<1000
```

とします。このとき、白が正極 (N 極)、黒が負極 (S 極) を表します。

✓ 太陽表面に出現する黒点は正極・負極のペアで出現します。なぜでしょうか？

偏光観測には、ゼーマン効果の仕組み上、視線と垂直方向の磁場の向きには 180 度の不定性が残ります。今回扱うデータは、180 度不定性を解いたものとなります。したがって、磁場の東西・南北成分もベクトルとしてプロットすることができます。

```
IDL> x=indgen(871) & y=indgen(512)
IDL> set_line_color
IDL> velovect,data_sot_bp[0:**:20,0:**:20],data_sot_bt[0:**:20,0:**:20] $
IDL> ,x[0:**:20],y[0:**:20],/over,color=3
```

✓ 正極からは磁場が宇宙空間へ湧き出し、負極へと収束していく様子を確認しましょう。

¹ データ：https://csac.hao.ucar.edu/sp_data.php

さらに、HMI による太陽全面の磁場データもプロットします。以下のデータを読み込み、プロットします。

```
IDL> file_hmi='hmi.M_720s.20141024_021200_TAI.1.magnetogram.fits'  
IDL> read_sdo,file_hmi,index_hmi,data_hmi  
IDL> data_hmi=rot(data_hmi,index_hmi.crota2)  
IDL> window,1 & loadct,0  
IDL> plot_image,data_hmi>(-500)<500
```

なお、HMI の画像データが 180 度回転しているため、途中で補正しています。

HMI は太陽全面の磁場を定常的に観測しますが、「ひので」は限られた視野を高い解像度で観測します。

✓ HMI と「ひので」の磁場データの違いは見られるでしょうか？

4. X線データ

「ひので」のX線望遠鏡（XRT：X-Ray Telescope）は、太陽全面や黒点周辺などのX線画像（温度：数100万度）を取得しています。Googleドライブのdata_xrtからデータをダウンロードし、2.で作成した作業ディレクトリに置きます。

SSWidlを起動し、データを読み込みます。

```
$ sswidl
IDL> file_xrt='XRT20141024_180306.2.fits'
IDL> read_xrt,file_xrt,index_xrt0,data_xrt0
```

このとき、index_xrt0には画像データのヘッダ情報が、data_xrt0には2次元の画像データそのものが格納されています。

XRT画像を表示します。

```
IDL> loadct,3
IDL> plot_image,alog10(data_xrt0>100.<2000.)
```

この画像はAl_meshフィルタによる画像です。ここでは、画像内で明るさが何桁も異なる（ダイナミックレンジが大きい）ため、alog10()によって明るさをログスケールに変換しています。

✓ 黒点の周辺（活動領域）には高温のループが存在することが分かります。

XRT画像には、宇宙線がCCDに衝突したピクセルや露光過多など、様々なノイズが含まれます。そこで、データのキャリブレーションを行います。

```
IDL> spike=1
IDL> xrt_prep,index_xrt0,data_xrt0,index_xrt,data_xrt $
IDL> ,/float,despike_despot=3
IDL> window,1
IDL> plot_image,alog10(data_xrt>1.<2000.)
```

元の画像と比較すると、改善されている様子が分かります。

```
IDL> blink,[0,1]
```

✓ 極域などに暗い「コロナホール」が存在する様子が分かります。

次に、同じ時刻に撮影された SDO 衛星 AIA (Atmospheric Imaging Assembly) による紫外線画像データと比較します。以下のデータを読み込みます。

```
IDL> window,2
IDL> file_304='aia.lev1_euv_12s.2014-10-24T180309Z.304.image_lev1.fits'
IDL> read_sdo,file_304,index_304,data_304
IDL> aia_lct,rr,gg,bb,wavelnth=304,/load
IDL> plot_image,alog10(data_304>1.<1000.)
IDL>
IDL> window,3
IDL> file_171='aia.lev1_euv_12s.2014-10-24T180312Z.171.image_lev1.fits'
IDL> read_sdo,file_171,index_171,data_171
IDL> aia_lct,rr,gg,bb,wavelnth=171,/load
IDL> plot_image,alog10(data_171>5.<5000.)
IDL>
IDL> window,4
IDL> file_131='aia.lev1_euv_12s.2014-10-24T180310Z.131.image_lev1.fits'
IDL> read_sdo,file_131,index_131,data_131
IDL> aia_lct,rr,gg,bb,wavelnth=131,/load
IDL> plot_image,alog10(data_131>1.<500.)
```

このとき「304」は He II 304Å (約 5 万度)、「171」は Fe IX 171Å (約 60 万度)、「131」は Fe VIII (約 40 万度) および Fe XXI (約 1000 万度) を含む波長帯を表します。

- ✓ 温度によってプラズマの見え方が異なることが分かります。どのように見え方が変わるとでしょうか？

5. IRIS データ

NASA の IRIS 衛星は彩層や遷移層の紫外線スペクトルを取得し、大気中の速度・密度などの物理量を測定しています。ここでは、2014 年 10 月 24 日 21:24 UT に生じた X3.1 クラスフレアの観測データ²を解析します。Google ドライブの data_iris からデータをダウンロードし、2.で作成した作業ディレクトリに置きます。

SSWidl を起動し、IRIS データのファイル名を定義します。

```
$ sswidl
IDL> file_1330='iris_l2_20141024_205222_3860111353_SJI_1330_t000.fits'
IDL> file_2796='iris_l2_20141024_205222_3860111353_SJI_2796_t000.fits'
IDL> file_ras='iris_l2_20141024_205222_3860111353_raster_t000_r000000.fits'
```

はじめに、スリットジョー画像を確認します。

```
IDL> loadct,3
IDL> read_iris_l2,file_1330,index_1330,data_1330
IDL> stepper,alog10(data_1330>1.<10000.)
```

キーボードの「m」を押すとムービーが自動再生されます（終了は「q」）。画像内で明るさが何桁も異なる（ダイナミックレンジが大きい）ため、`alog10()`によって明るさをログスケールに変換しています。

✓ フレアの発生に伴って、黒点の周囲に明るい「フレアリボン」が広がる様子を確認しましょう。

スリットジョー画像とは、スリットの当たっている太陽面上の位置を確認するために取得した画像です。「1330」は C II 1330 Å 輝線の付近の波長帯、「2796」は Mg II k 2796 Å 輝線の付近の波長帯を示します。この観測はスリットを太陽面上に固定した「sit-and-stare」観測によるものですが、太陽面上でスリットをスキャンさせるラスタ観測も存在します。

Mg II k のスリットジョー画像は、以下のように確認します。

```
IDL> read_iris_l2,file_2796,index_2796,data_2796
IDL> window,1
IDL> stepper,alog10(data_2796>1.<10000.)
```

² データ：https://www.lmsal.com/hek/hcr?cmd=view-event&event-id=ivo://sot.lmsal.com/VOEvent%23VOEvent_IRIS_20141024_205222_3860111353_2014-10-24T20:52:222014-10-24T20:52:22.xml

続いて、スリットに沿って取得したスペクトルを確認します。

```
IDL> read_iris_l2,file_ras,index_cii,data_cii,wave='C II'  
IDL> window,2  
IDL> stepper,alog10(data_cii>1.<10000.)
```

このとき、x軸は波長です。スリットジョーで確認したフレアリボンの位置では、スペクトルの強度が増大している（明るくなっている）様子がわかります。同時に、波長方向にも明るい構造が移動したり広がったりしています。すなわち、フレアリボンではスペクトルは波長方向に偏移する、すなわち、ドップラー速度（視線方向速度）を持つことが分かります。

同様に、Mg II k スペクトルも確認します。

```
IDL> read_iris_l2,file_ras,index_mgii,data_mgii,wave='Mg II'  
IDL> window,3  
IDL> stepper,alog10(data_mgii>1.<10000.)
```

スペクトルを詳しく見ると、赤方偏移（レッドシフト：視線方向に沿って遠ざかる）や青方偏移（ブルーシフト：視線方向に近づく）する成分が見られます。これは、フレアに伴い、上空のプラズマが下降・上昇する様子を表しています。

正確な波長を得るには、以下のようにします。

```
IDL> l_cii=index_cii[0].twmin1+(index_cii[0].twmax1-index_cii[0].twmin1) $  
IDL> /float(index_cii[0].naxis1-1)*indgen(index_cii[0].naxis1)
```

- ✓ 波長の偏移からドップラー速度を求めてみましょう。
- ✓ ヒント：ドップラー速度と波長偏移の関係式を使います→ $\Delta V/c = \Delta\lambda/\lambda_0$

特徴的な時刻については、スペクトルを1次元でプロットし、スペクトル形状を確認すると良いでしょう。

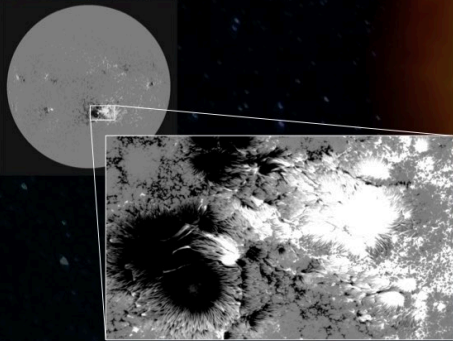
なお、IRIS は多くの場合「ひので」と同時観測を行っています。この観測も「ひので」との共同観測であり、「ひので」データも存在します。

データ解析実習

3グループに分かれて実施します

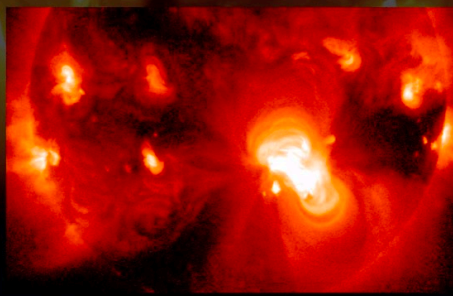
「磁場データ」

- ・ 内容：ひので可視光望遠鏡が捉えた黒点のベクトル磁場データを解析します
- ・ 目標：黒点の3次元的な磁場構造を理解します
- ・ 担当：鳥海 森



「X線データ」

- ・ 内容：ひのでX線望遠鏡が捉えた太陽全面のX線画像を解析します
- ・ 目標：SDO衛星の紫外線データとも比較し、温度による見え方の違いを調べます
- ・ 担当：吉田 南



「IRISデータ」

- ・ 内容：IRIS衛星が捉えたフレア爆発の分光・撮像データを解析します
- ・ 目標：分光情報から物理量を導出する方法を学びます
- ・ 担当：鄭 祥子

