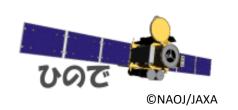
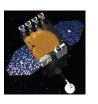


# 宇宙天気ミニ講座太陽編

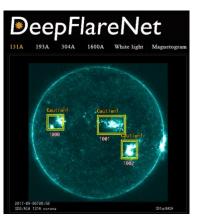




SDO衛星©NASA

### 西塚直人

情報通信研究機構 電磁波研究所宇宙環境研究室



https://defn.nict.go.jp

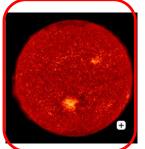
## NICT宇宙天気予報センター

https://swc.nict.go.jp/



宇宙天気予報内容を配信 (1日2回更新) 太陽活動から地球大気まで、 予報対象は様々。

- ▶ 太陽
- ▶地球磁気圏(静止衛星軌道)
- ▶ 電離圏(超高層大気)



太陽編

① 現況チャート(定常観測)



② 予測モデル(研究開発)





③ 観測データ公開



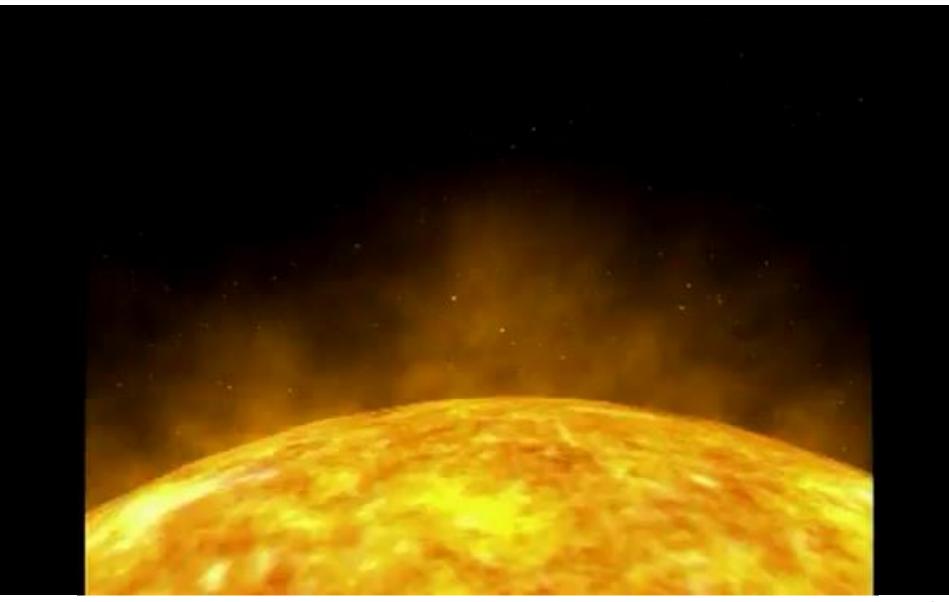




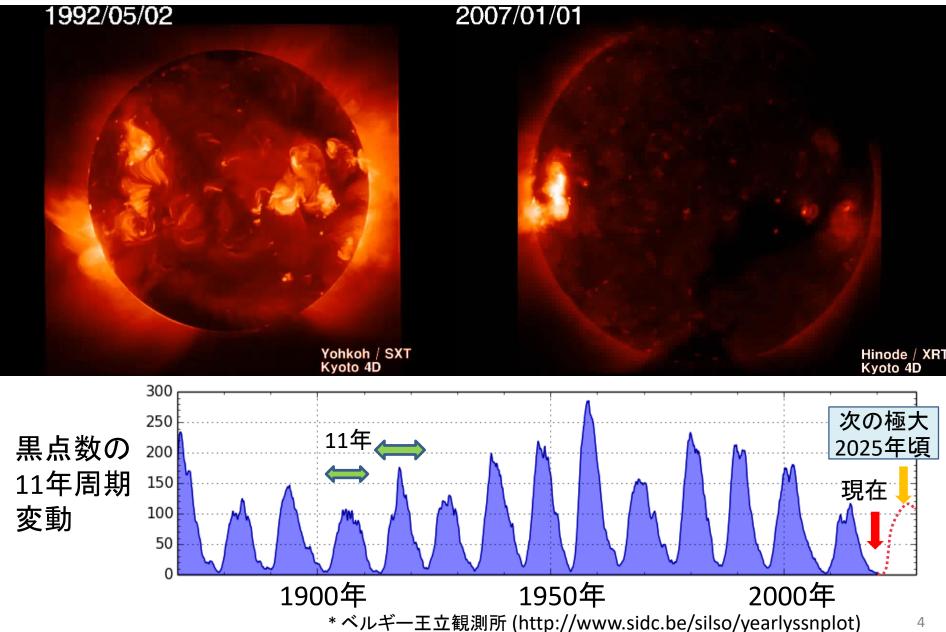
#### 【ミニ講座の内容】

- どうやって見たらいいの? (見方・使い方)
- 何が起こっているの? (自然現象の理解)

# 太陽フレアと宇宙天気



# 活動期(極大期) 太陽活動の11年周期 <sub>静穏期(極小期)</sub>

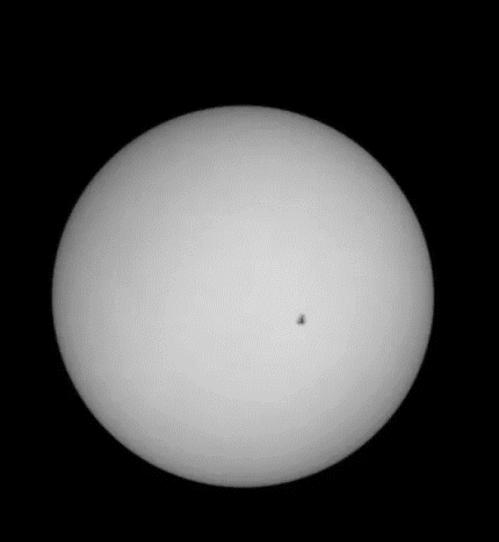


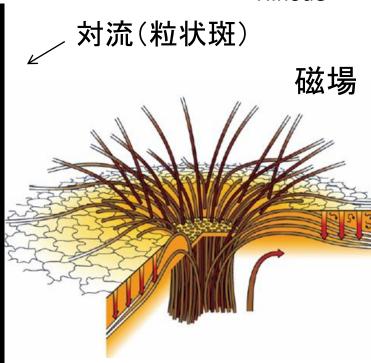
# 「ひので」衛星が見た黒点



G-バンドフィルター, ひので可視光望遠鏡

Hinode





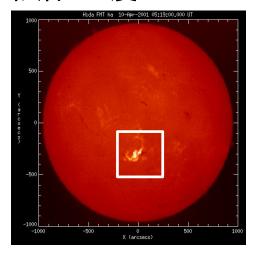
from Thomas & Weiss 2002 ARAA

太陽内部から磁場が浮上してきて黒点ができる。



地球の大きさ

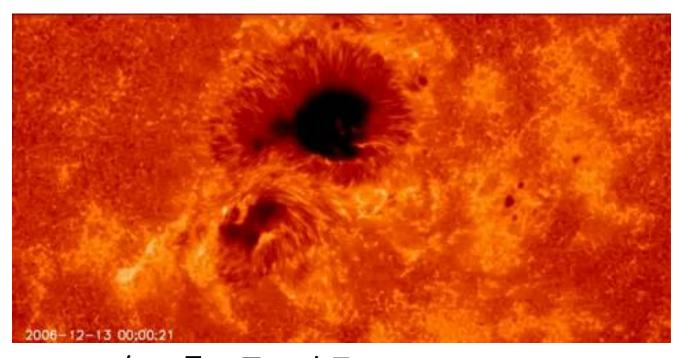
#### 彩層1万度



# 太陽フレア

19世紀中頃発見、黒点近傍で発生 サイズ~(1-10)万km 太陽系最大の爆発現象:水爆10万-1億個)

発生メカニズムが1世紀以上謎



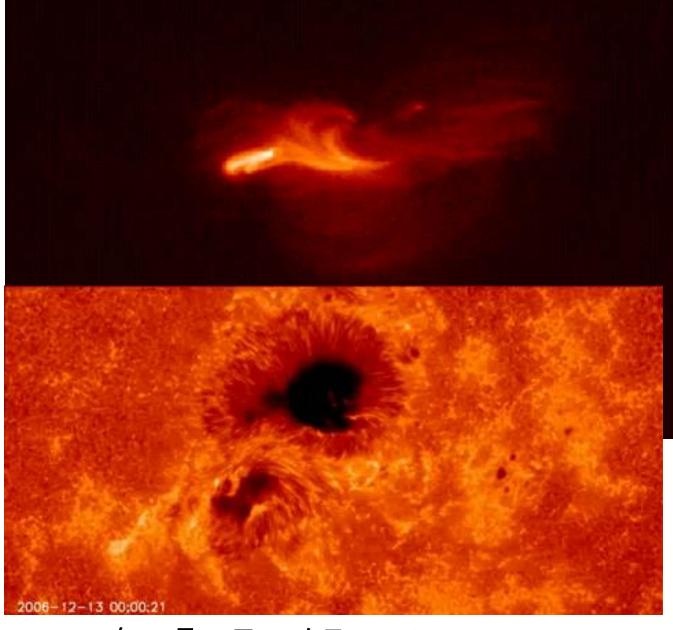
2006年12月13日 Xクラス・フレア ひので可視光望遠鏡カルシウムフィルター

# 太陽フレア

右上図: **軟**X線→ 2011年2月14日 Mクラス・フレア ひのでX線望遠鏡 Ti polyフィルター

太陽フレアは大量の放射線(X線など)や高エネ粒子を放射する。arcade

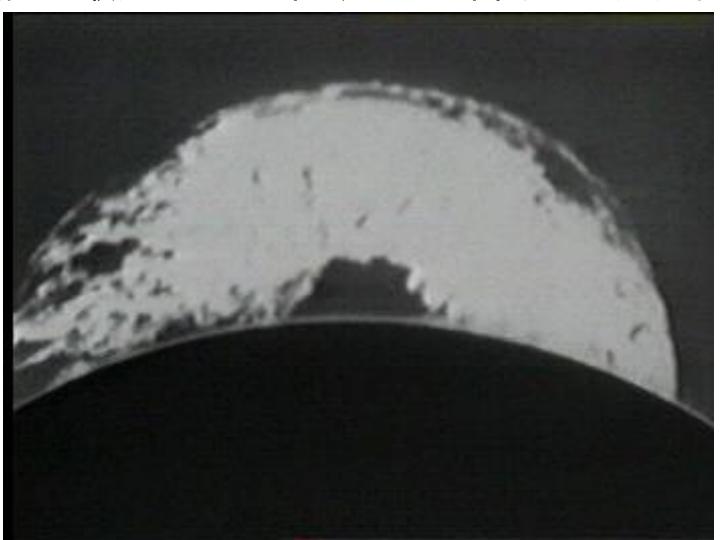
Hα two ribbon



2006年12月13日 Xクラス・フレア ひので可視光望遠鏡カルシウムフィルター

# 太陽プロミネンス(紅炎)噴出

(史上最大:1946年6月4日:米国HAO天文台)



地球の

大きさ

ヘリカルな螺旋状構造は磁場を表している。

# コロナ質量放出(CME)

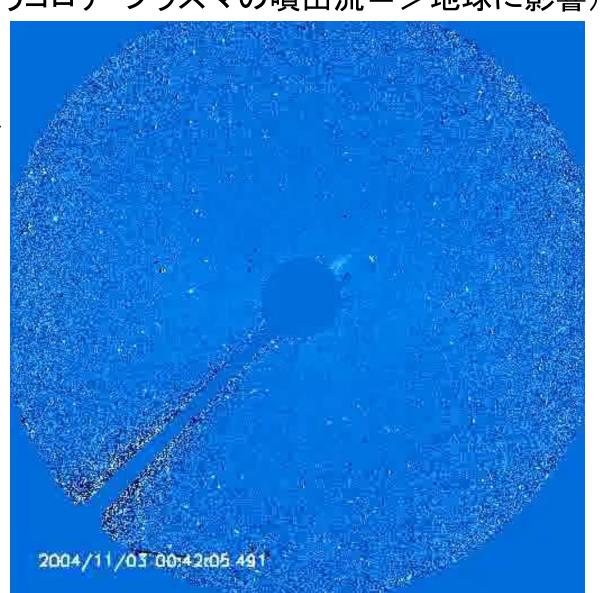
(フレアにともなうコロナ・プラズマの噴出流=>地球に影響)

速度~秒速 100-1000km、 質量~10億トン (SOHO/LASCO, 可視光/人工日食)

2-3日後に地球に到達



明るい太陽部分は→ 円盤で遮蔽



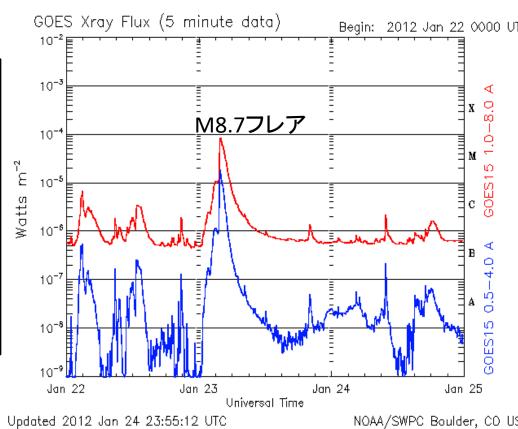
# 太陽フレアに伴うX線

太陽フレアの規模はこの観測(赤線) から決められている。

| フレア<br>の規模 | 最大X線量Fx<br>[W/m²]        | 発生<br>頻度 |
|------------|--------------------------|----------|
| X          | 10 <sup>-4</sup> < Fx    | 30       |
| M          | $10^{-5} < Fx < 10^{-4}$ | 30回      |
| С          | $10^{-6} < Fx < 10^{-5}$ | 300回     |
| В          | $10^{-7} < Fx < 10^{-6}$ | 3,000回   |
| Α          | $10^{-8} < Fx < 10^{-7}$ |          |

大規模なフレアが起こると、通常の 100~1,000倍のX線が地球に降り注ぐ。 (地震と同じく1桁ごとにクラス分け)

▶ デリンジャー現象(通信異常)

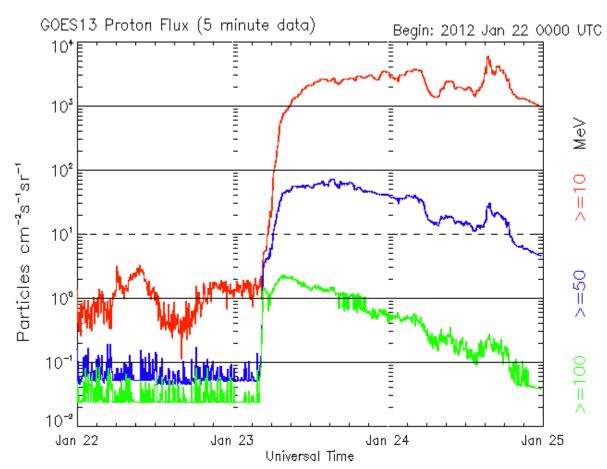


http://www.swpc.noaa.gov/

# 太陽からやってくる高エネ粒子(プロトン)

プロトンは水素の原子核。 太陽フレアに伴って加速されて 放出される。

- 大きなプロトン現象時には 通常の1000~1万倍に。
- ▶宇宙飛行士、パイロットの被曝
- ▶ 短波通信の途絶(極冠吸収)
- ▶ 人工衛星の誤動作



Updated 2012 Jan 24 23:56:03 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

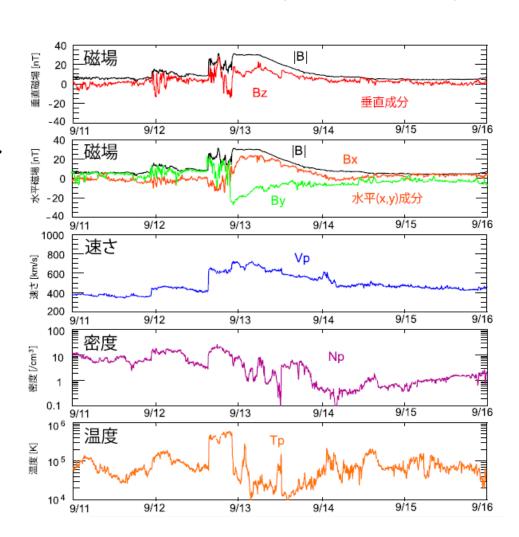
http://www.swpc.noaa.gov/

# 希薄なガスの定常的な流れ(太陽風)

太陽風は2-4日で地球に到達。 地球から150万kmの(月の4倍遠い) ところにあるACE, DSCOVR衛星を用い、 直前(到達1-2時間前)に観測。

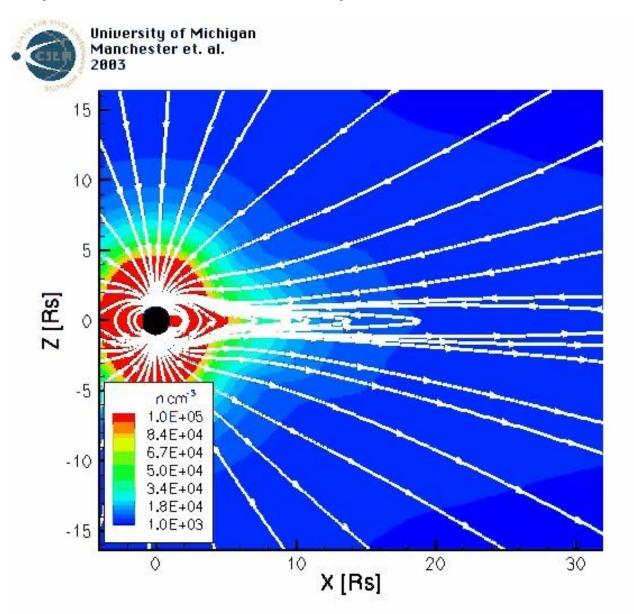
- 速度や密度、磁場の強さが分かる。
- 速い太陽風が地球に吹きつけると、 地磁気が乱される。





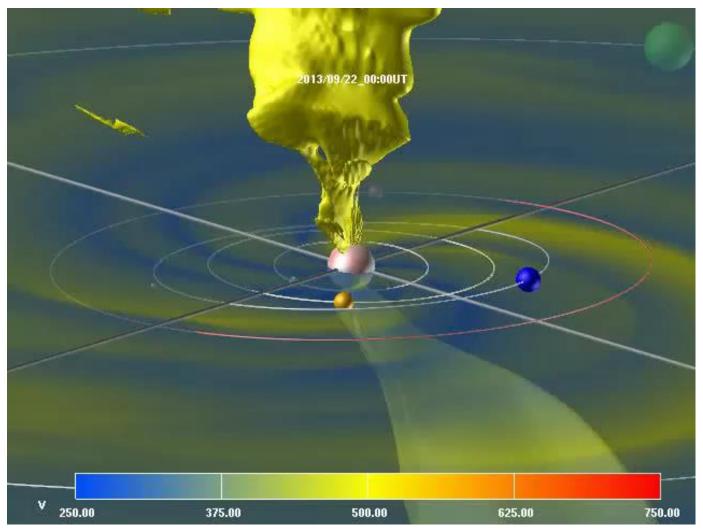
ACE, DSCOVR衛星のデータ受信アンテナは米・独・日・韓にある。 日本はNICT小金井本部で受信。

# 太陽フレア・太陽風と地磁気嵐



宇宙天気予報

# 2013~2014年の太陽風(宇宙嵐)



Shiota et al. 2014

360° 惑星探査 にも影響



水星(水色)・金星(橙)・地球(青)・火星(赤)・木星(緑)

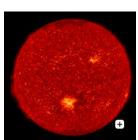
# NICTの宇宙天気情報

太陽編

## NICT宇宙天気予報センター

https://swc.nict.go.jp/





① 現況チャート(定常観測)



② 予測モデル(研究開発)







③ 観測データ公開





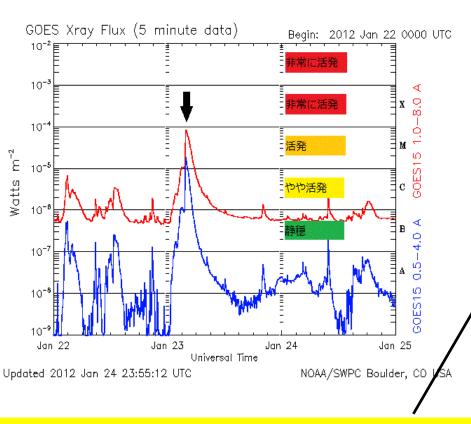


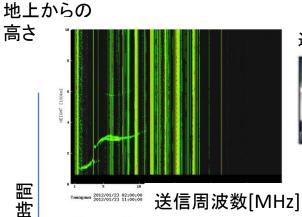
#### 太陽関連の予測

- ▶ 太陽フレア
- ▶プロトン粒子
- ▶地磁気嵐(擾乱)
- ▶ デリンジャー現象 (通信異常)

## 太陽フレア予報

今後1日間に発生すると予想される 最大の太陽フレアの規模の予報





Yamagawa 2012/01/23 04:00:00 UT 2012/01/23 13:00:00 LT

通常の短波伝搬







通常の短波伝搬



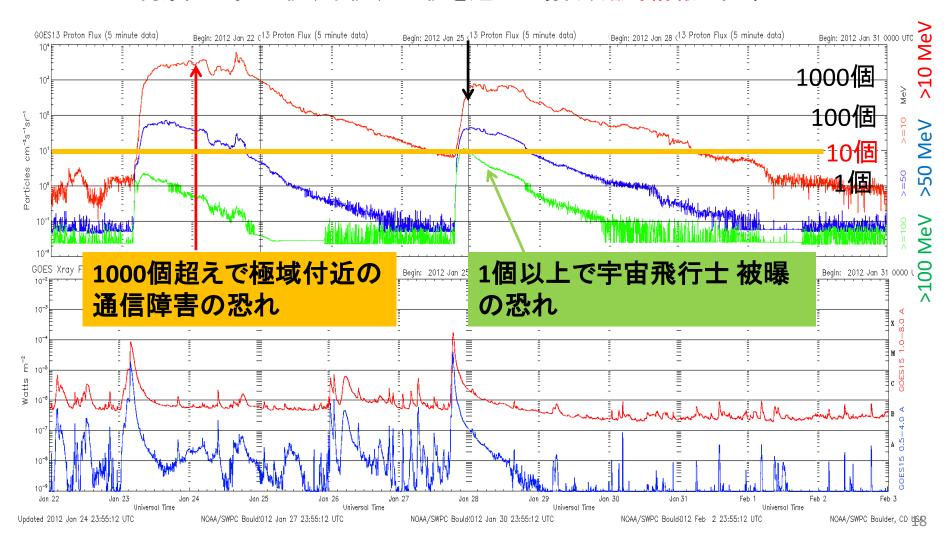
太陽フレア予報が活発、非常に活発の場合

→ デリンジャー現象(短波通信障害)が起こる可能性が高い。

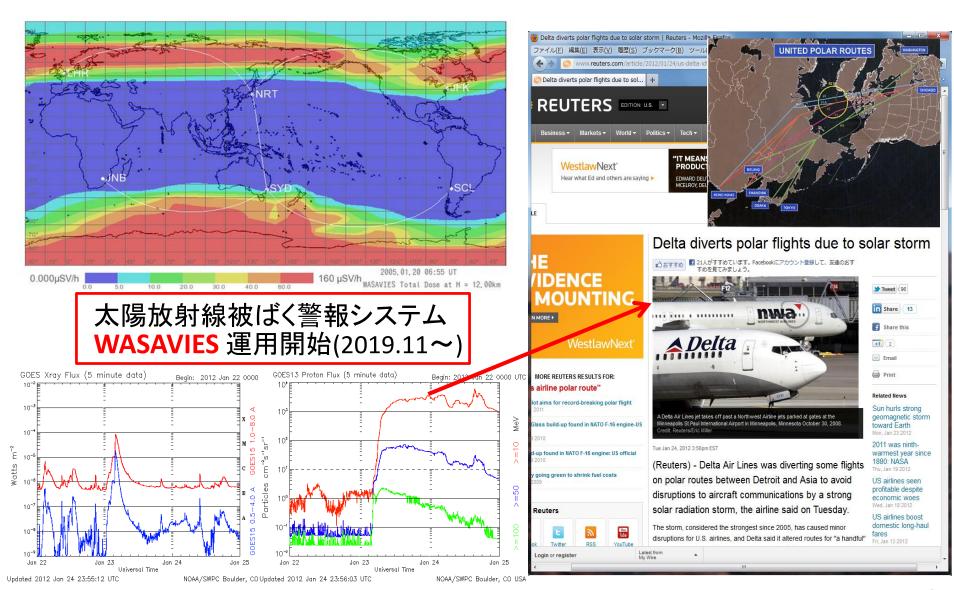
※詳しくは 雷離圏編

# プロトン現象情報

赤線(10MeV以上のエネルギーのプロトン)がオレンジ線(10個 cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>)を超えると、プロトン現象発生。100個、千個、1万個を超えた場合、臨時情報が発令!



## 2012/1/23 民間航空機が飛行ルート変更



# AI技術を用いた太陽フレア予測

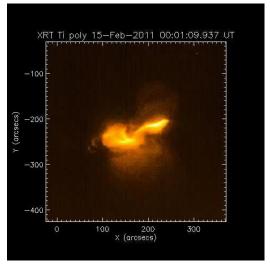
開発編

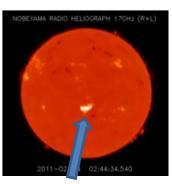
# ■ 太陽フレアの発生と予測

#### 黒点成長とエネルギー蓄積(Hinode/SOT)

#### 2011-02-12 10:02:34 UT 300 -160 200 -180 Solar-Y [arcsec] -200 100 -220 0 -100 -260 -200 -280 -500 -450-400 -350 -300 Solar-X [arcsec] Made by Y. Iida

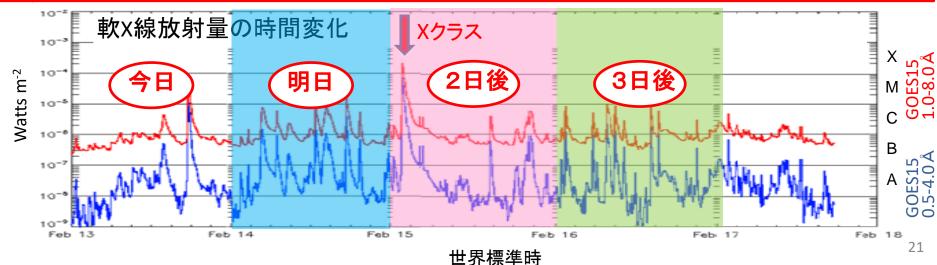
#### フレア観測(Hinode/XRT)





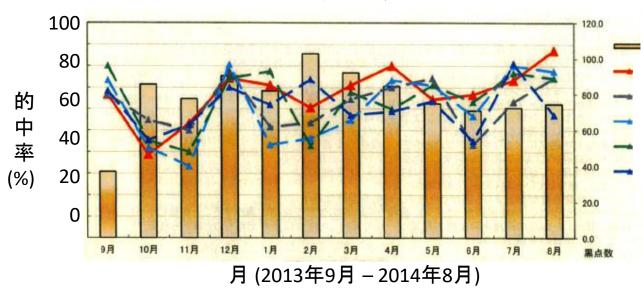
太陽フレア (野辺山電波 ヘリオグラフ)

#### これから1日間に、最大どの規模のフレアが発生するのか?を予測する



# ■ 宇宙天気予報の現状

2013年9月~2014年8月 黒点数とフレア予測適中率



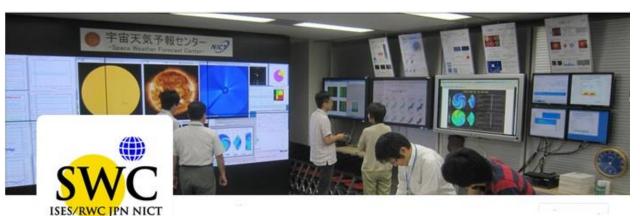
黒点数(月平均数) 東京 ボルダー(米国) シドニー ブリュッセル 北京 チェジュ 2015~

\*国際宇宙環境サービス



人手を介した予測: 的中率~40-80%

> スキルスコア: TSS~0.5 (-1.0 < TSS < 1.0)



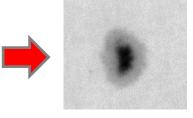
## ■AI技術を用いた太陽フレア予測モデル開発

Deep Flare Net (Nishizuka et al. 2018,2020 ApJ論文掲載)

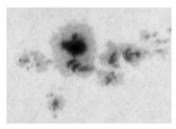


Yohkoh, 軟X線

1日の衛星データ: 1.5TB以上 →人の処理能力を越えた膨大なデータ



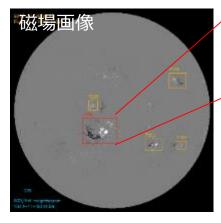
単純な黒点:穏やか

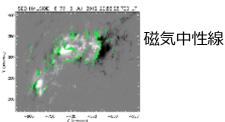


複雑な黒点:フレア起きる!

・・・のような判断を、AIにさせる。

学習データ:過去6年分の30万枚の太陽画像(4k×4k)。黒点領域を自動検出し、特徴量を抽出。





ベクトル磁場

従来:TSS=0.5

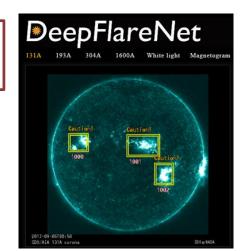
J

A.I.: TSS=0.89

(TSS=1で100%的中)

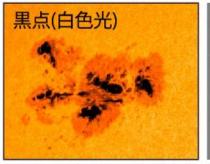
予報運用ウェブ公開(2019.4~)

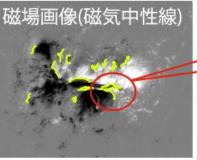
- ・深層学習とビッグデータで、太陽フレアの発生予測を8割へアップ
- ・AI技術が太陽フレア予測にも有効であることを実証。現在、運用検証中



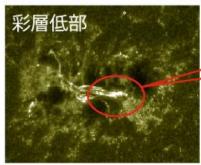
#### AIによる分析で分かった

## ■フレア予測に有効な黒点の特徴





地震の断層面の ように磁場の歪み がたまる場所



発光部分

◆黒点の特徴の重要度ランキング

| 1 | 太陽フレアの発生実績  |  |
|---|-------------|--|
| 2 | 磁気中性線の長さ・本数 |  |
| 3 | 磁場の強さ・磁束量   |  |
| 4 | 彩層低部の発光     |  |
| 5 | 磁場の歪み具合     |  |
| 6 | 時間変化の度合い    |  |

矢印の向きと 大きさから磁場 の歪みがわかる

磁場画像(歪み)

- 黒点の約60個の特徴の有効性を比較した。
- ⇒ 地震と同じくエネルギー蓄積とトリガー現象が鍵!
- ★いまだに解明されていない太陽フレアの発生メカニズム を解明する鍵が得られた。

## ■まとめと今後

- 太陽活動は宇宙天気の源であり、フレアやコロナ質量放出 (CME)、高エネルギー粒子(プロトン)などを発生する。
- 太陽フレアを予測することで、従来よりも早い予報が可能になり、 宇宙天気の影響による災害の早期対策へ貢献できる。
- 従来人手による予測を行ってきたが、様々な大量の観測データが利用できるようになった現在、AI技術(深層学習)を用いた太陽フレア予測手法の有効性が示された。現在、Deep Flare Netによる予報ウェブ公開を行っている。https://defn.nict.go.jp
- 太陽放射線被ばく推定システムWASAVIESも昨年運用を開始し、 ICAO (国際民間航空機関)に情報提供中。https://wasavies.nict.go.jp
- リアルタイムのより精度の高い予報情報として活用されるよう、 ユーザーご意見も取り入れながら今後さらに改良していきたい。