



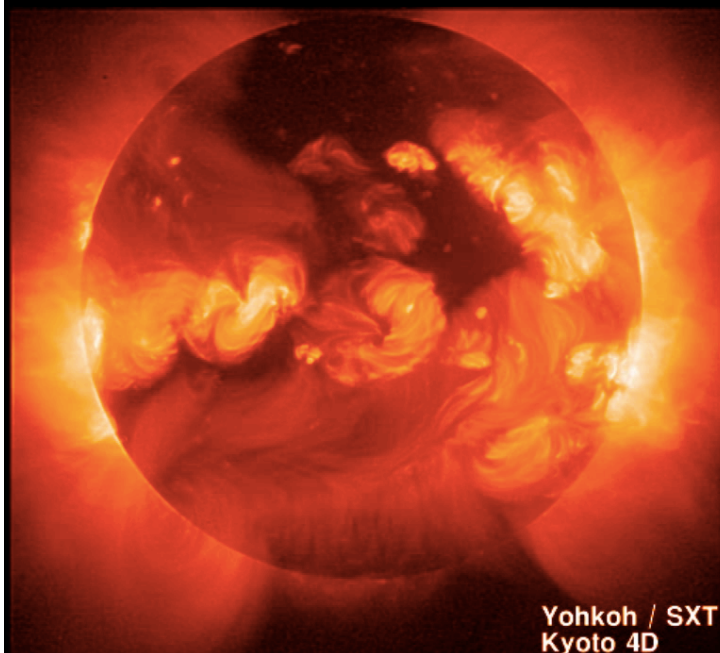
## ビッグデータ解析手法を用いた 宇宙天気予報アルゴリズムの開発

磯部 洋明<sup>1</sup>, 村主 崇行<sup>2</sup>, 柴山 拓也<sup>3</sup>, 羽田 裕子<sup>4</sup>,  
柴田 一成<sup>1,4</sup>, 根本 茂<sup>1,5</sup>, 駒崎 健二<sup>5</sup>

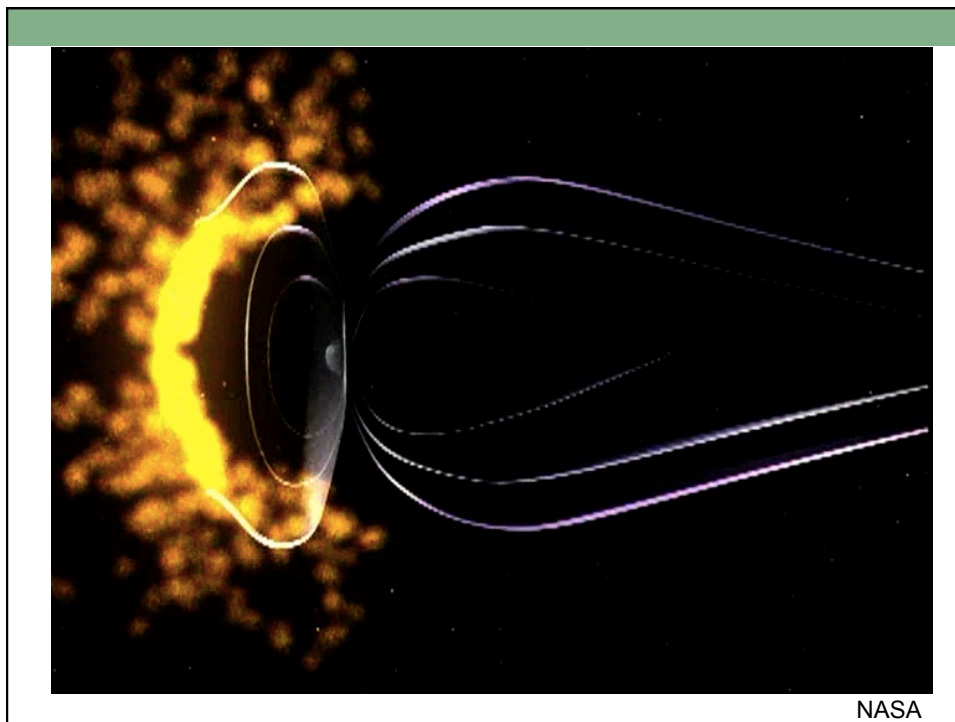
1. 京都大学宇宙総合学研究ユニット
2. 理化学研究所
3. 名古屋大学太陽地球環境研究所
4. 京都大学大学院理学研究科附属天文台
5. 株式会社ブロードバンドタワー

電気三学会関西支部講演会 2014年9月12日

1992/01/12

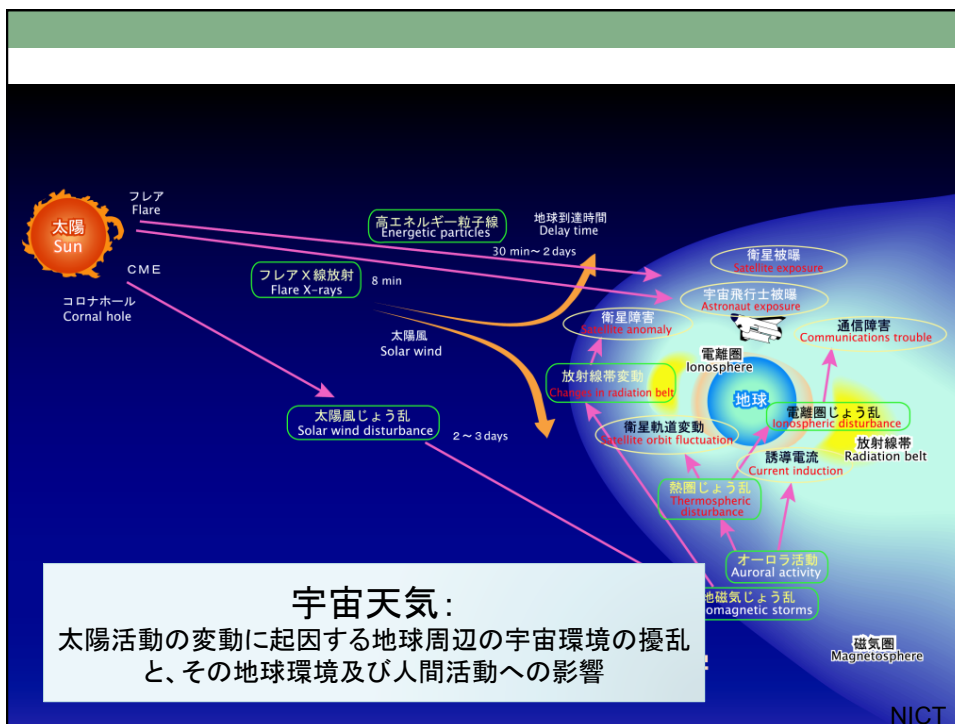


Yohkoh / SXT  
Kyoto 4D

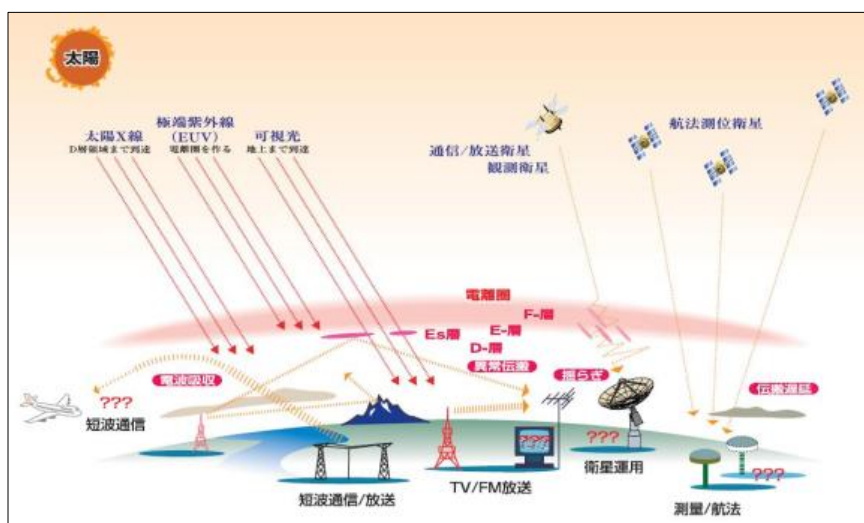


## 概要

- 太陽活動と宇宙天気
- 宇宙天気予報アルゴリズムの開発
- ちょっとこわい話



## 電離層への影響と通信・測位障害

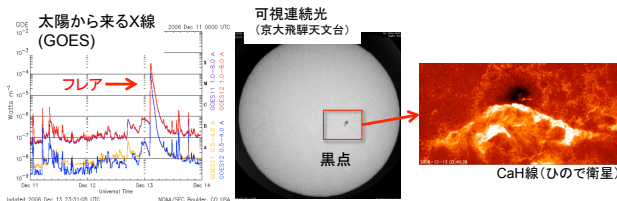


## 様々な時間スケールで変動する太陽

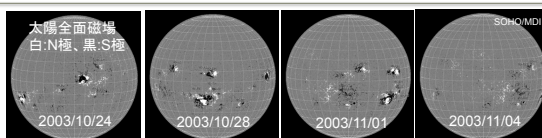
### 太陽フレア

時間スケール: 数分~数時間

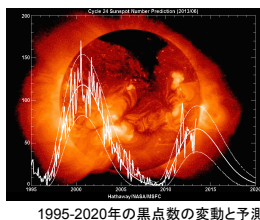
多波長で電磁波が急激に増大



活動領域(=黒点群)  
時間スケール: ~1ヶ月  
一つの黒点(群)の寿命は数週間~  
数ヶ月太陽の自転(~27日)による変動も。



太陽活動周期  
時間スケール:  
~11年  
黒点数が約11年  
の周期で増減する。



1995-2020年の黒点数の変動と予測

### 長期変動

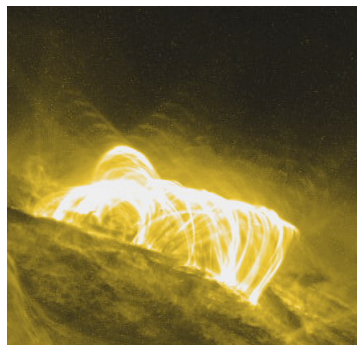
時間スケール: >100年  
黒点数が極端に少ない時期が数10年続く時期がある。地球気候との間に相関。

1609年以降  
の黒点数の  
変動



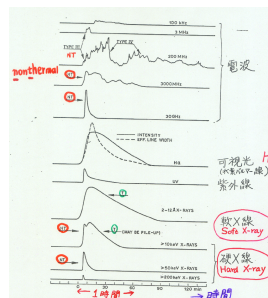
## 太陽からやってくるもの1: 電磁波

- 太陽フレア発生時にX線、EUV、電波などが急激に増光
- 継続時間: 数分~数時間
- 光速で届く=見た時にはもう遅い
- フレアの発生が予測できないと予報もできない



### 地球への影響

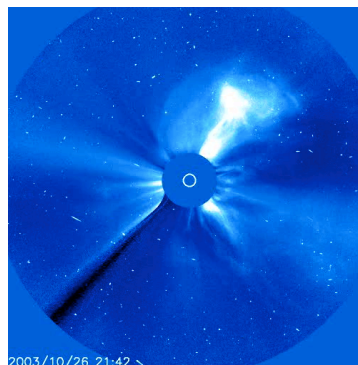
- 電離圏異常(通信、測位障害)
- 高層大気加熱膨張による衛星の大気抵抗増加=>衛星の姿勢・軌道が変わる
- (長期変動は地球気候へも影響?)





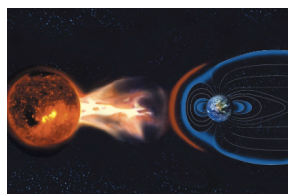
## 太陽からやってくるもの2: 太陽風・コロナ質量放出

- 太陽風＝常時流れ出しているプラズマ
- フレア発生時は、惑星間空間にプラズマ塊が放出(コロナ質量放出;CME)
- フレア発生時以外にも太陽風変化がある
- CMEの太陽を出てから地球に届くまで1-2日かかる。太陽面・惑星間空間での観測があれば、地球への到来をある程度予報できる



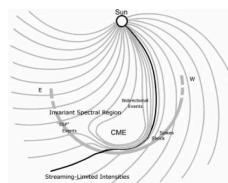
### 地球への影響

- オーロラサブストーム
- 放射線帯粒子増加
- 地磁気嵐、地磁気誘導電流
- 電離圏異常
- これらの結果としての、衛星及び地上インフラの障害、通信、測位障害



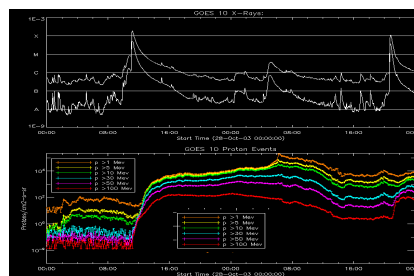
## 太陽からやってくるもの3: 高エネルギー粒子

- 太陽風＝常時流れ出しているプラズマ
- フレア発生時は、惑星間空間にプラズマ塊が放出(コロナ質量放出;CME)
- フレア発生時以外にも太陽風変化がある
- CMEの太陽を出てから地球に届くまで1-2日かかる。太陽面・惑星間空間での観測があれば、地球への到来をある程度予報できる



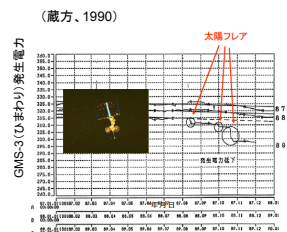
### 地球への影響

- 地磁気嵐、オーロラ
- 放射線帯粒子増加
- 地磁気誘導電流
- 電離圏異常
- これらの結果としての、衛星及び地上インフラの障害、通信、測位障害



## 宇宙天気現象による被害 1/2

- 2009年米NASのレポートでは、過去最大級の太陽フレアが発生した場合経済損失は2兆ドルに及ぶ。<sup>\*</sup>
- 人工衛星への被害
  - 高エネルギー粒子によるデバイスの故障、太陽電池パネルの劣化
  - シングルイベント: 高エネルギー粒子が回路上に電荷を作り、ソフトウェアエラーが発生)
  - 低軌道の衛星では、高層大気の膨張による急激な大気ドラッグによる姿勢、軌道の変化
- 宇宙飛行士被曝
  - 大フレア時は船外活動で実効20-30mSv、船内5mSv程度<sup>\*\*</sup>
  - 近年で最大の1989年のフレア程度で、静止軌道以遠の船外活動では、数1000mSvになる恐れ(五家2006)



<sup>\*</sup><http://www.courierpostonline.com/article/20130606/NEWS05/306060027/Space-weather-needs-more-attention-experts-say?gcheck=1>

<sup>\*\*</sup> 矢部 第7回放射線安全規制検討会航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ

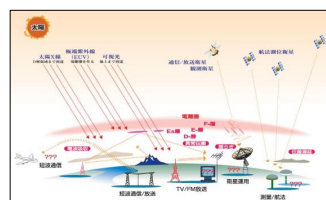
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/006/shiryo/05061801/003.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/006/shiryo/05061801/003.pdf)

## 宇宙天気現象による被害 2/2

- 航空機の運用
  - 短波通信、GPSを用いた運行システムの障害
  - 2003年10-11月の巨大フレアでは、WAAS (Wide Area Augmentation System、米国FAAの航空ナビゲーションシステム) が10数時間使用できなくなった。
  - フレア時は航空機内の放射線も増大
- 地上インフラ(主に高緯度地域)
  - 送電線、発電所への誘導電流(1989年ケベック州で大規模停電、原発の被害も)
  - パイプライン腐食
- 通信、測位(GPS)の障害
  - 衛星そのものの障害
  - 電離圏擾乱による電波の異常吸収、散乱、遅延



1989年のフレアで被害を受けた米NJ州の原発の変圧器

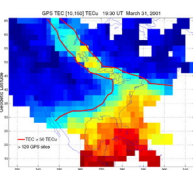


電離圏擾乱と通信、測位障害(NICT)

## 宇宙天気データの例 1/2

### 地磁気変動

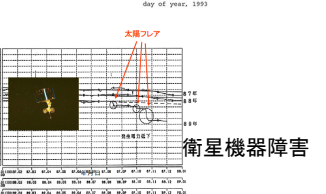
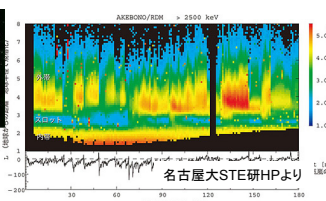
- 地上ステーション
- 定常観測・原則公開
- データ量: 小



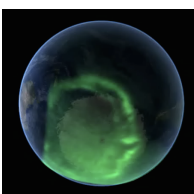
電離層電子数  
地上ステーション、GPS



放射線帯電子フラックス  
衛星観測



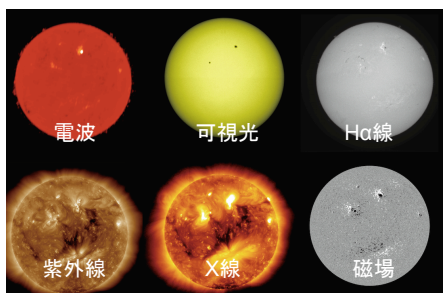
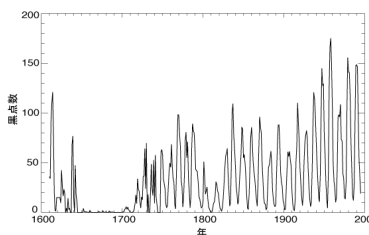
衛星機器障害



オーロラ  
地上、衛星

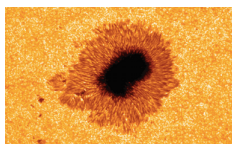
## 宇宙天気データの例 2/2

黒点数  
1609年以来400年以上。人類が持つ  
最も長期の連続的科学観測データ



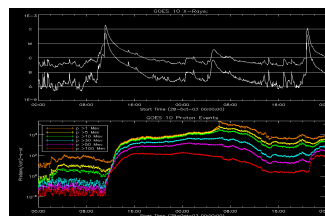
多波長(電波~X線)で観測した太陽全面像

- 衛星(定常的)、地上望遠鏡(お天気次第)
- NASA SDO衛星だけで1.5TB/日



### 太陽部分像

- 重要な部分だけを精密に観測
- データの質や取得率はバラバラ



太陽から地球に来ているX線、高エネルギー粒子

## 宇宙天気「予報」の現状と課題

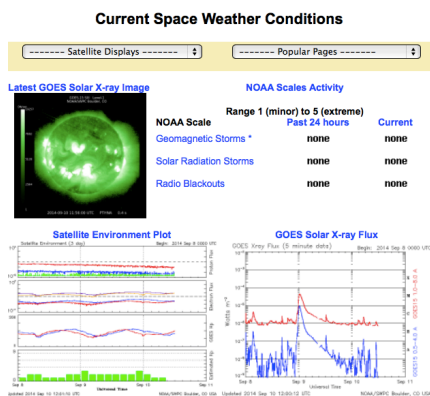
### • Nowcast

#### • 太陽面/太陽風の観測を元にしたモデル計算による予報

- 数時間～2日後の予報まで
- 光速(に近い速度)で来る電磁波や高エネルギー粒子は予測できない

#### • 太陽フレアの発生予報

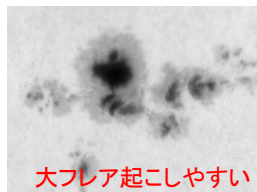
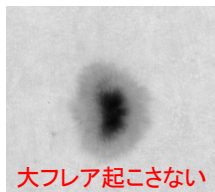
- **これがまだ(ほとんど)できていない**



米海洋大気庁  
<http://www.swpc.noaa.gov>

## 太陽フレアの物理と発生予報の現状

- 黒点周辺に蓄えられた磁気エネルギーの突発的解放
  - 地震に似ている。発生頻度もべき乗則(自己組織臨界現象?)
  - = 予知は難しい。見えてる分地震よりマシか。
- 複雑な構造を持つ黒点ほど大フレアを起こしやすい



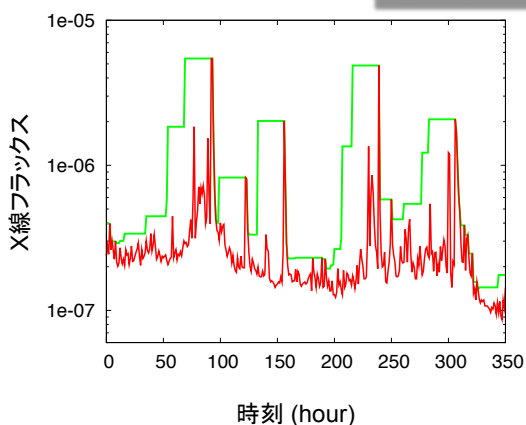
- 現状は、黒点の形態学的分類による予報(Bloomfield+ 2012)
- 物理的洞察や磁気流体シミュレーションモデルによる予報モデルが研究途上

## 私たちが目指していること

- ビッグデータ化している宇宙天気データを活用して
  - ✓ 実用的な宇宙天気予報アルゴリズムを作りたい
  - ✓ 基礎科学として新しい知見を得たい
- まずは**太陽フレア発生予報**の実現を目指す
- 将来は、地上インフラ、衛星インフラ、電波障害など個別の被害予測への拡張へ

## 予報対象

ある時点から24時間以内に  
起こるフレアの最大値を予報する



- フレアの判定に用いられるGOES衛星のX線フラックスを用いる。
- ある時刻から24時間後までのGOESフラックスの最大値を計算する。
- それを再現することができれば予報の達成。

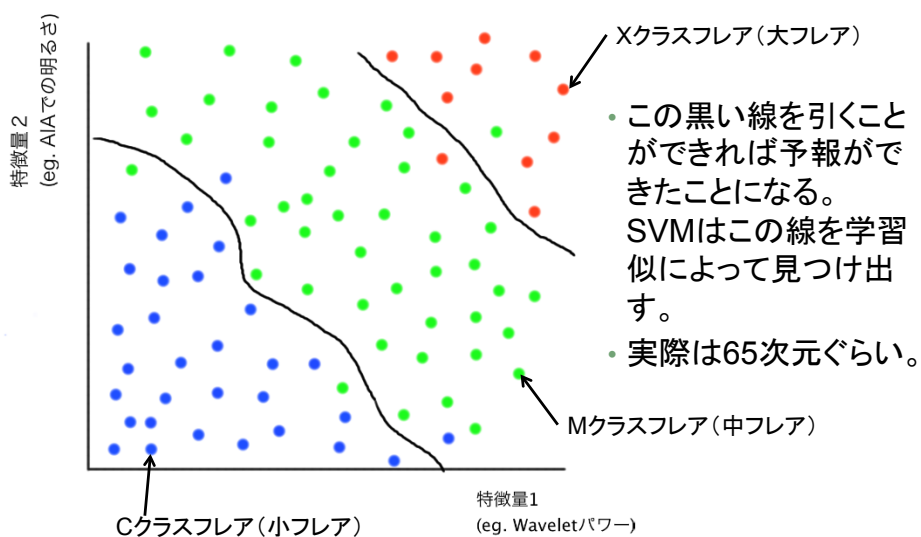
赤：GOES衛星が観測したX線フラックス  
 緑：その時刻から24時間後までのGOESフラックスの最大値

## 予報アルゴリズム

1. ある時刻における太陽面の状況(=主として画像データ)を数値指標化して、1次元の特徴ベクトルで表す
2. 機械学習(サポートベクターマシン)で特徴ベクトルから予報対象への写像を学習する
3. 太陽面の状況(特徴ベクトル)を入力すると、予報値(24時間以内のX線強度ピーク値)を得ることができる

時刻	特徴ベクトル(太陽面磁場等)	予報対象(24時間以内のX線強度)
$t = 0$	$[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$	$\rightarrow y(t=0)$
$t = 1$	$[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$	$\rightarrow y(t=0)$
$t = 2$	$[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$	$\rightarrow y(t=0)$
	$\vdots$	
$t = N$	$[x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$	$\rightarrow y(t=n)$

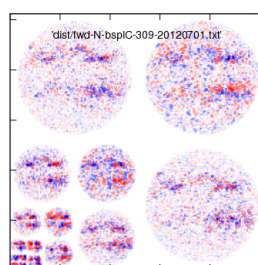
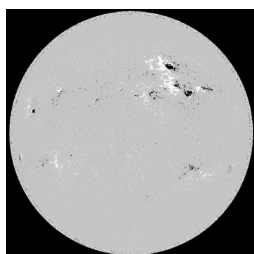
## サポートベクターマシン (SVM)





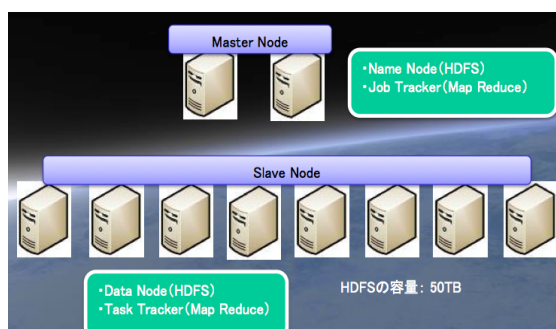
## 太陽面画像データから特徴ベクトルの生成

- 磁場が複雑ほどフレアがおきやすい(経験則と物理的推察)
- 全面磁場画像に2次元 Wavelet 変換を施し、各波長成分のパワーを特徴ベクトルの要素とする
- データは米国Solar Dynamic Observatory (SDO)衛星の全面磁場(1枚/1h, 期間は2011-2012年)を利用
  - データの質が一定なので扱いやすい



## システム構成

- CPU : Intel Xeon (4 core x 10 台)、メインメモリ : 16 G / 台
- Hadoop(分散処理システム)
- Map & Reduce アルゴリズムによる分散
- ブロードバンドタワー社内に設置



## 結果

$$TSS = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN}$$

TP : True Positive

Cクラスフレア	観測 有	観測 無
予報 有	4948	438
予報 無	1510	1462

Mクラスフレア	観測 有	観測 無
予報 有	1215	1310
予報 無	544	5289

Xクラスフレア	観測 ○	観測 ×
予報 有	209	1725
予報 無	45	6379

- True Skill Statics (TSS)で予報アルゴリズムの性能を評価

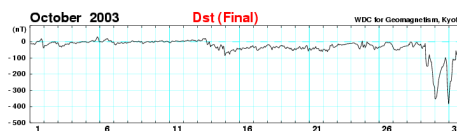
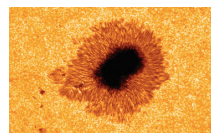
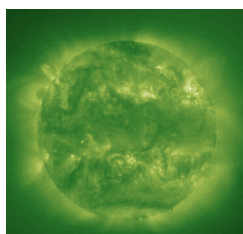
- 黒点の形状分類に基づく経験則 (Bloomfield+2012)と比較して、現状は同程度の成績。

TSS = 1 だと100%予報的中

TSS スコア	Cクラス	Mクラス	Xクラス
本研究	0.54	0.49	0.61
Bloomfield+	0.44	0.53	0.74

## 拡張性

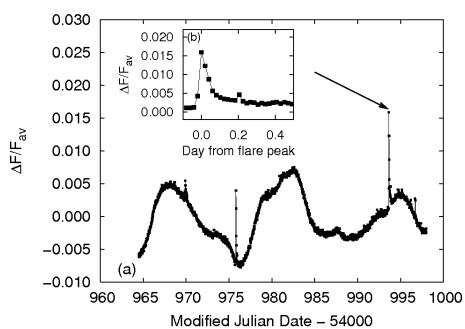
- 入力となる特徴ベクトルを拡張、改良
  - => 予測性能の向上
  - 多波長の画像
  - 狭視野高解像度画像
  - 時間変化の情報
  - 物理的推察に基づく特定の物理量
- 予報対象も変えられる
  - 地磁気変動(地磁気嵐)
  - オーロラ発生
  - 通信障害
  - 宇宙放射線
  - 株価
  - 内閣支持率
  - 阪神タイガースの順位
  - ...





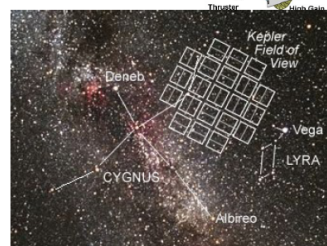
## スーパーフレアの発見

(Maehara et al. 2012 Nature)



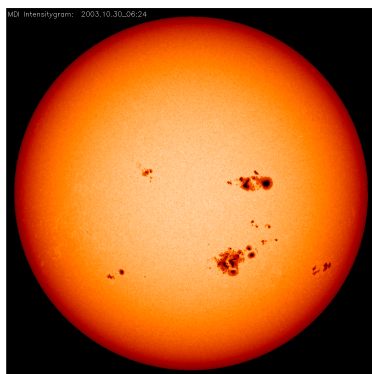
太陽とそっくりの恒星を大量に観測したところ、  
最大級の太陽フレアの1000倍にもなる  
スーパーフレアを起こす星を148個も発見！

ケプラー衛星  
(太陽系外惑星  
探査用の  
宇宙望遠鏡)

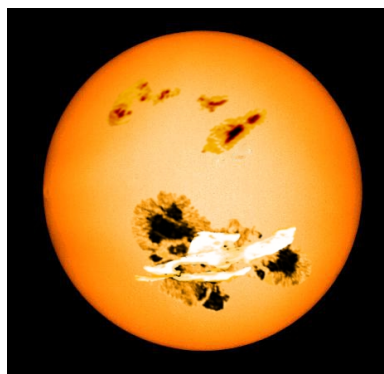


京大理学部 of 学部生たちの成果

## スーパーフレア想像図



普通の太陽

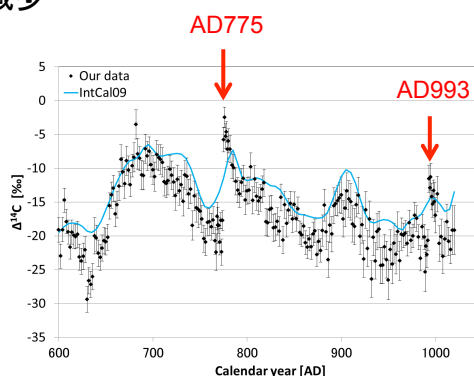


スーパーフレアを起こす太陽型星

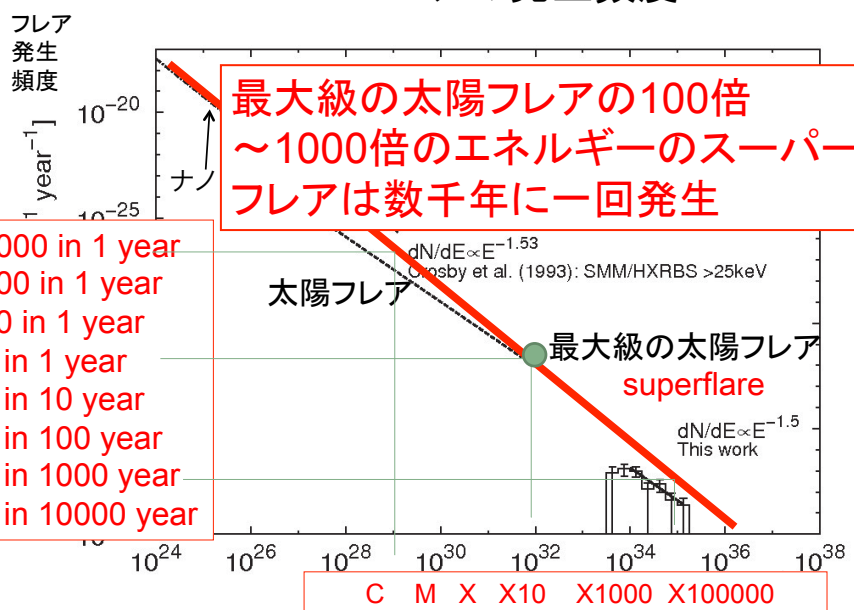
## もし太陽で起きたらどうなる？

- 人工衛星壊滅(気象、通信、GPS...)
- 全地球規模で停電
- 航空機程度の高度でも深刻な被爆
- オゾン層の長期にわたる減少
- 大阪でオーロラ

8世紀と10世紀に大量の宇宙線が飛来(Miyake et al. 2012, 2013)  
巨大太陽フレアか？



## スーパーフレアの発生頻度



京大飛騨天文台での宇宙天気観測継続のためのクラウドファンディング  
<https://academist-cf.com/projects/4/shibata>

皆様のご支援お願い致します。by 柴田一成・京都大学大学院理学研究科附属天文台長

柴田一成  
 +  
 クラウドファンディング  
 で検索！

The screenshot shows the Academist crowdfunding interface. At the top, the project title is '太陽フレアの機構と宇宙天気予報の研究'. Below the title, there are tabs for 'プロジェクト内容', 'コメント (37)', and '進捗報告'. A video player is embedded, showing a man (Shibata Ichiro) presenting a slide titled '太陽フレア' (Solar Flare). The slide lists statistics: '19世紀中葉発見', '観測記録や発生場所', '観測されるエネルギー密度', 'サイズ: 1-10<sup>7</sup> km', 'エネルギー', '10<sup>21</sup> J', '水深10万-1億倍', and '太陽系最大の爆発現象'. Below the video, it says '飛騨天文台で観測された太陽フレアの貴重な映像のひとつです。'. To the right of the video, there is a profile for the organizer: '挑戦者: 柴田一成', '所属: 京都大学理学研究科附属天文台', and '役職: 教授 (台長)'. Below the profile is a photo of the organizer and a link to the '天文台公式サイト'.

## 結論

- 人類文明は太陽活動と宇宙環境の擾乱に対し、どんどん脆弱になっている  
 (宇宙天気が一番関心をもっているのは...)
- 太陽・宇宙天気観測データは、種類も増え、量も増大。個々の研究者による手作業の解析とは別の方法論が必要になってきた。  
 =>ビッグデータ解析手法を用いた宇宙天気予報
- 1000年に1回の極端事象は、真剣に考えるべき脅威。天文学者の責任大。



