

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

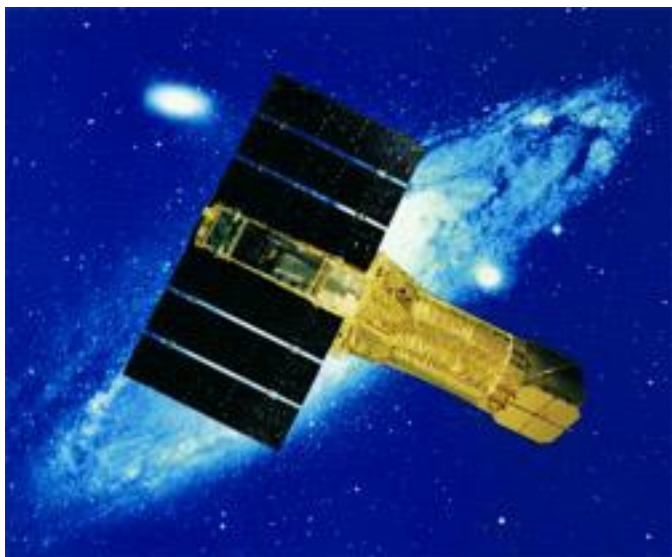
柴山 拓也¹, 村主 崇行¹, 羽田 裕子¹, 磯部 洋明¹, 柴
田 一成¹, 根本 茂^{1,2}, 駒崎 健二²

(1) 京都大学、(2) 株式会社ブロードバンドタワー



宇宙天気予報とは

- 太陽フレアやコロナ質量放出(CME)により地球に高エネルギー粒子が到達したり磁気嵐が起こる。
- 衛星の故障や大停電を引き起こすことがある。
- 宇宙利用が増大する現代に必要なリスク管理。



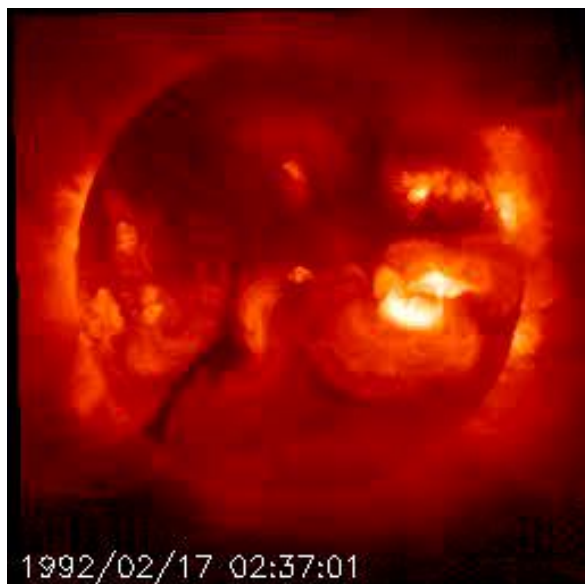
2000年の太陽フレアの影響で
大気圏に再突入したあすか衛星

1989年の大磁気嵐で故障した
アメリカの変圧器

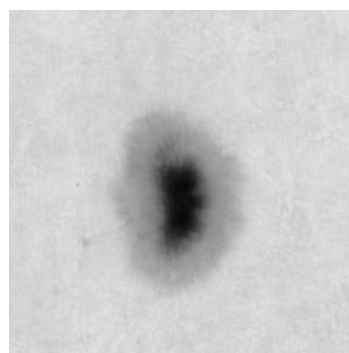


太陽フレアとは

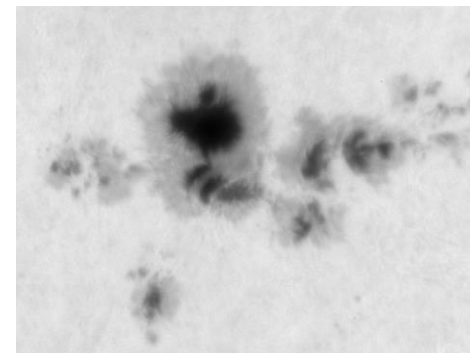
- 黒点周辺に蓄えられた磁気エネルギーの解放による太陽表面での爆発現象。
- 複雑な構造を持つ黒点ほどフレアを起こしやすいなどの傾向がある。
- GOES衛星で観測される太陽全面のX線強度で定義される



Yohkoh, 軟X線



単純な黒点



複雑な黒点
フレアを起こしやすい

京大飛騨天文台, SMART, 可視連続光

既存の宇宙天

- 太陽黒点形状の分類
- 磁場の自由エネルギー
- 数百年間研究されて重要だと思われる具
- 自動化されている部

Table 2
McIntosh Classification Flare Statistics

McIntosh Region	SWPC (1988–1996)				Kildahl (1969–1976) ^b				Combined Flare Rate (24 hr ⁻¹)				Poisson Flare Probability (%)				
	Region	Total Flares			Region	Total Flares			In GOES Class				In GOES Class			Above GOES ^c	
Classes ^a	Count	C	M	X	Count	C ^e	M	X	C	M	X	$\pm\sigma$	C	M	X	M1.0	C1.0
AXX	2748	82	10	0	2517	75.1	31	3	0.03	0.01	0.00	0.01	3	1	0	1	4
BXO	3342	217	18	1	1906	123.8	41	2	0.06	0.01	0.00	0.01	6	1	0	1	7
BXI	0	0	0	0	334	0.0	20	0	0.00	0.06	0.00	0.05	0	6	0	6	6
HRX	336	21	1	0	211	13.2	7	1	0.06	0.01	0.00	0.04	6	1	0	2	8
HSX	1968	94	21	0	1963	93.8	99	6	0.05	0.03	0.00	0.02	5	3	0	3	8
HAX	598	49	13	0	222	18.2	14	0	0.08	0.03	0.00	0.03	8	3	0	3	11
HHX	53	3	1	0	150	8.5	16	2	0.06	0.08	0.01	0.07	6	8	1	9	14
HKX	49	11	2	0	38	8.5	7	0	0.22	0.10	0.00	0.11	20	10	0	10	28
CRO	745	102	3	0	368	50.4	20	2	0.14	0.02	0.00	0.03	13	2	0	2	15
CRI	6	2	0	0	152	50.7	7	0	0.33	0.04	0.00	0.08	28	4	0	4	31
CSO	1504	284	27	0	1020	192.6	40	1	0.19	0.03	0.00	0.02	17	3	0	3	19
CSI	14	8	2	0	211	120.6	16	2	0.57	0.08	0.01	0.07	44	8	1	9	48
CAO	1455	361	38	2	232	57.6	18	1	0.25	0.03	0.00	0.02	22	3	0	3	25
CAI	27	14	6	0	166	86.1	19	0	0.52	0.13	0.00	0.07	40	12	0	12	48
CHO	88	21	2	1	112	26.7	8	1	0.24	0.05	0.01	0.07	21	5	1	6	26
CHI	2	1	0	0	29	14.5	6	0	0.50	0.19	0.00	0.18	39	18	0	18	50
CKO	135	59	11	0	52	22.7	13	2	0.44	0.13	0.01	0.07	35	12	1	13	44
CKI	17	14	6	0	28	23.1	6	2	0.82	0.27	0.04	0.15	56	23	4	27	68
DRO	63	12	3	0	75	14.3	6	0	0.19	0.07	0.00	0.09	17	6	0	6	23
DRI	2	7	0	0	54	189.0	7	1	3.50	0.12	0.02	0.13	97	12	2	13	97
DSO	546	198	26	1	553	200.5	51	6	0.36	0.07	0.01	0.03	30	7	1	7	36
DSI	39	34	6	0	246	214.5	31	1	0.87	0.13	0.00	0.06	58	12	0	12	63
DSC	0	0	0	0	20	0.0	5	2	0.00	0.25	0.10	0.22	0	22	10	30	30
DAO	1775	784	124	4	288	127.2	28	2	0.44	0.07	0.00	0.02	36	7	0	7	40
DAI	391	419	70	6	324	347.2	58	7	1.07	0.18	0.02	0.04	66	16	2	18	72
DAC	8	5	3	0	46	28.8	12	1	0.62	0.28	0.02	0.14	46	24	2	26	60
DHO	46	26	1	1	43	24.3	11	0	0.57	0.13	0.01	0.11	43	13	1	14	51
DHI	11	14	1	0	41	52.2	3	0	1.27	0.08	0.00	0.14	72	7	0	7	74
DHC	0	0	0	0	6	0.0	2	0	0.00	0.33	0.00	0.41	0	28	0	28	28
DKO	217	178	55	5	43	35.3	14	2	0.82	0.27	0.03	0.06	56	23	3	25	67
DKI	223	288	69	6	88	113.7	42	6	1.29	0.36	0.04	0.06	73	30	4	33	81
DKC	57	93	35	5	100	163.2	72	10	1.63	0.68	0.10	0.08	80	49	9	54	91
ESO	95	37	6	0	82	31.9	14	0	0.39	0.11	0.00	0.08	32	11	0	11	39
ESI	18	33	1	0	78	143.0	22	2	1.83	0.24	0.02	0.10	84	21	2	23	88
EAO	459	267	61	0	47	27.3	10	4	0.58	0.14	0.01	0.04	44	13	1	14	52
EAI	295	370	83	2	82	102.8	48	1	1.25	0.35	0.01	0.05	71	29	1	30	80
EAC	3	5	1	0	17	28.3	6	3	1.67	0.35	0.15	0.22	81	30	14	39	89
EHO	42	31	6	0	39	28.8	6	0	0.74	0.15	0.00	0.11	52	14	0	14	59
EHI	15	24	6	0	45	72.0	28	4	1.60	0.57	0.07	0.13	80	43	6	47	89
EHC	2	9	0	0	4	18.0	8	0	4.50	1.33	0.00	0.41	99	74	0	74	100
EKO	185	173	35	3	52	48.6	20	1	0.94	0.23	0.02	0.06	61	21	2	22	69
EKI	423	703	173	23	81	134.6	103	11	1.66	0.55	0.07	0.04	81	42	7	46	90
EKC	103	278	132	17	63	170.0	149	21	2.70	1.69	0.23	0.08	93	82	20	85	99
FRI	0	0	0	0	2	0.0	1	0	0.00	0.50	0.00	0.71	0	39	0	39	39
FSO	14	9	3	0	13	8.4	6	1	0.64	0.33	0.04	0.19	47	28	4	31	64
FSI	6	12	0	0	8	16.0	15	0	2.00	1.07	0.00	0.27	86	66	0	66	95
FAO	73	63	16	0	3	2.6	0	0	0.86	0.21	0.00	0.11	58	19	0	19	66
---	---	106	35	3	12	14.0	8	0	1.16	0.42	0.03	0.10	69	34	3	36	80
---	---	5	1	0	10	5.6	0	0	0.56	0.05	0.00	0.23	43	5	0	5	46
---	---	17	9	0	18	30.6	15	0	1.70	0.86	0.00	0.19	82	58	0	58	92
---	---	0	0	0	5	0.0	4	0	0.00	0.80	0.00	0.45	0	55	0	55	55
FKO	97	165	29	1	19	32.3	6	0	1.70	0.30	0.01	0.09	82	26	1	27	87
FKI	235	517	161	17	47	103.4	106	17	2.20	0.95	0.12	0.06	89	61	11	66	96
FKC	93	233	146	24	27	67.6	39	13	2.51	1.54	0.31	0.10	96	89	11	87	96

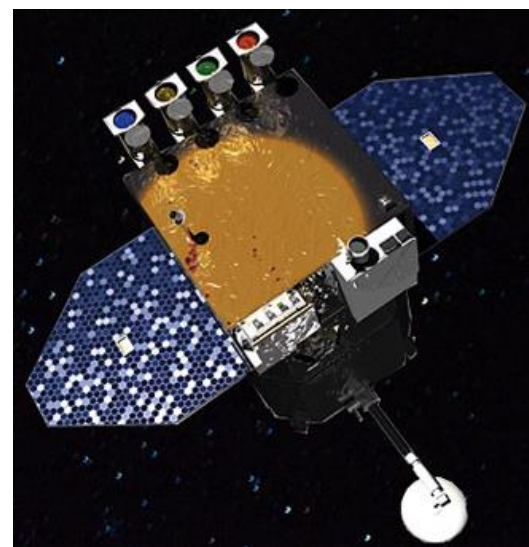
Bloomfield et al., 2012, ApJL, 747, 41

観測量の増大

- NASAのSDO衛星は1日に約1.5TBのデータを取得する。
(SOHO衛星の1000倍程度；柴山による試算)
- まさに観測データのビッグデータ化。
- 天文学者が1つ1つ黒点の分類などをしていくのは不可能。

最近社会ではビッグデータ解析が研究・
利用されて様々な成果が出ているらしい。

機械学習手法も近年大変発達している。



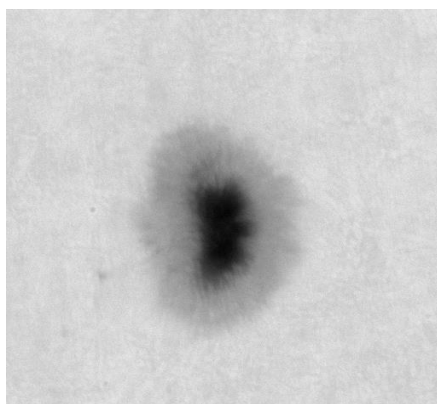
そこで、

ビッグデータ手法を使って
今までの予報精度を上回ることは
できないだろうか？

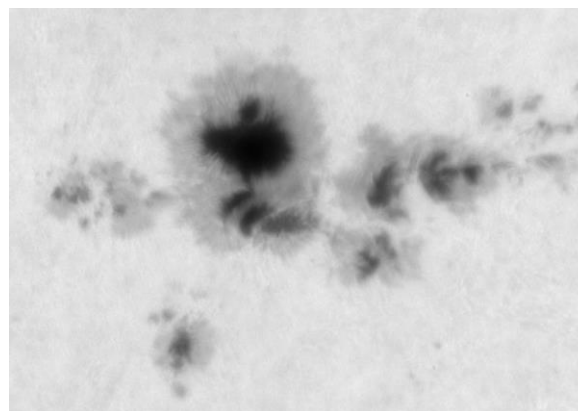
ついでに今まで見逃していた物理
を発見できたら嬉しい。

特徴量の抽出

- SDO/HMI による視線方向磁場分布を用いる (1枚/1h)。用いたのは2011, 2012年の2年分。
- 全球画像に2次元 Wavelet 変換を施し、各波長の成分すべての和をとる。
- 他にGOES衛星の観測データも用いた。



単純な黒点

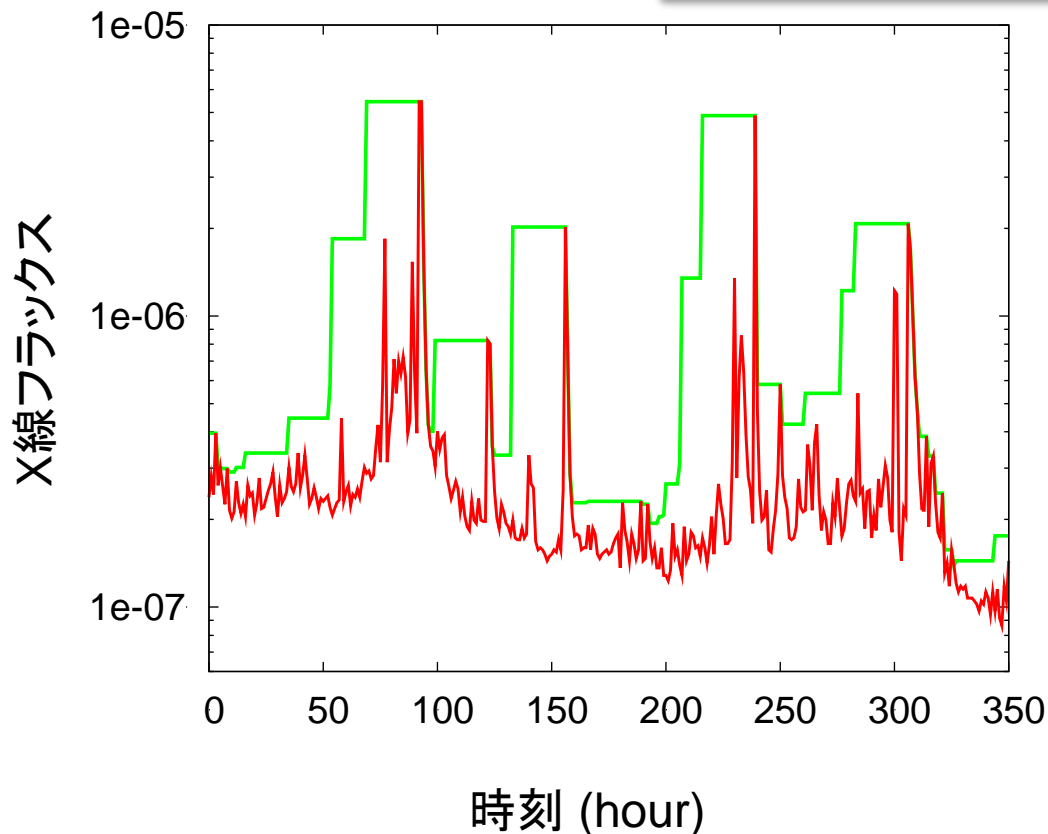


複雑な黒点

京大飛騨天文台, SMART, 可視連続光

予報対象

つまり、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したい。



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

- 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。

特徴ベクトルと予報対象

以下のような特徴ベクトルが各時刻についてできる。

$$t = 0 \quad : \quad [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

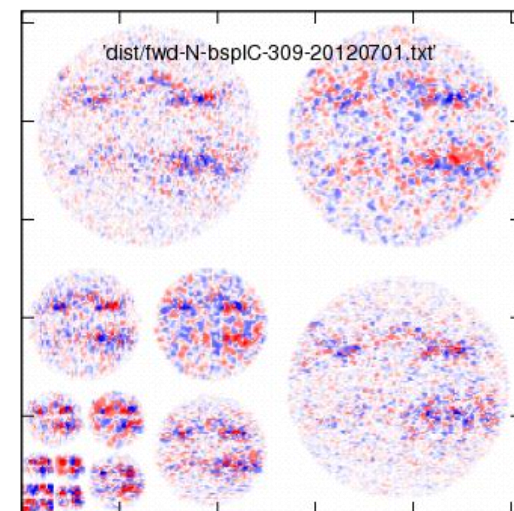
$$t = 1 \quad : \quad [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

$$t = 2 \quad : \quad [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

⋮

⋮

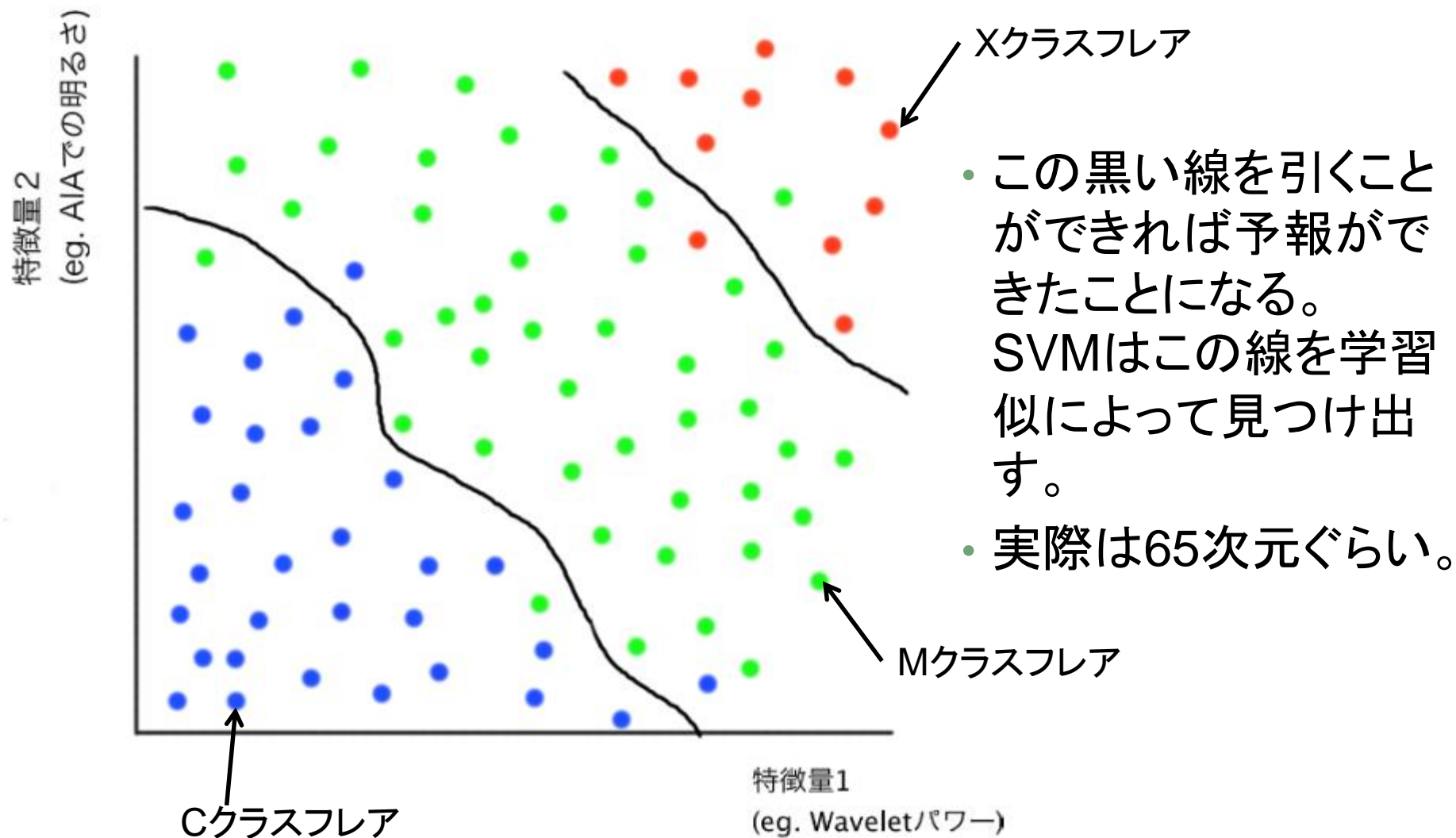
$$t = N \quad : \quad [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$$



特徴ベクトルから予報対象への写像を機械学習で学習すれば宇宙天気予報が実現する。

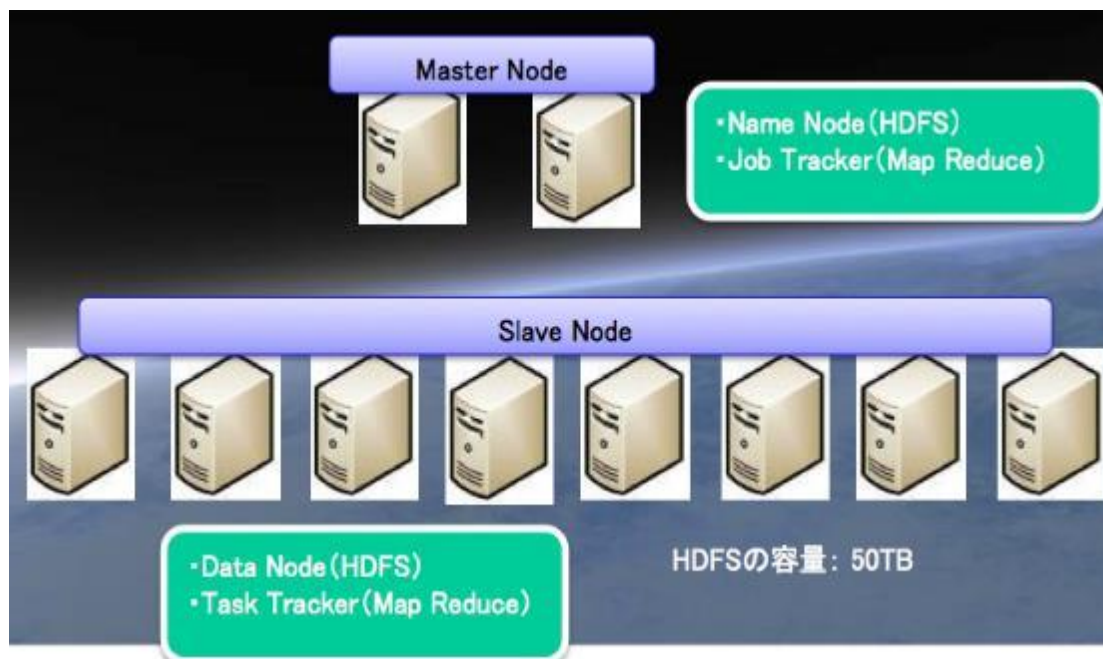
サポートベクターマシンによる機械学習を試みた。

サポートベクターマシン (SVM)



システム構成

- CPU : Intel Xeon (4 core x 10 台)、メインメモリ : 16 G / 台
- ビッグデータ解析で用いられるHadoopシステム(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 ○	フレア ×
予報 ○	4948	438
予報 ×	1510	1462

Mクラス	フレア ○	フレア ×
予報 ○	1215	1310
予報 ×	544	5289

Xクラス	フレア ○	フレア ×
予報 ○	209	1725
予報 ×	45	6379

- Bloomfield+ で提案された予報アルゴリズム評価方法を採用。
- Bloomfield+ では黒点形状ごとの統計からフレアを予測
- Bloomfield+ に近い予報精度を達成

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

結論と今後の発展

- wavelet変換という一般的な画像処理手法と機械学習を用いて黒点ごとのフレア発生統計を用いた従来手法に匹敵する精度の宇宙天気予報が実現できた。
- 物理的解釈をあまりせずに予報可能なので様々なデータを予報に取り入れられる。
- 太陽風の状態を観測しているACE衛星のデータ、地磁気の状態を表すDst指数なども特徴量 or 予報対象としていきたい。
→そうすればオーロラ予測もできる？
- 衛星障害を直接予報することもできる可能性がある。