

最大級の磁気嵐の成因に 関する研究

片岡龍峰

2024/11/26

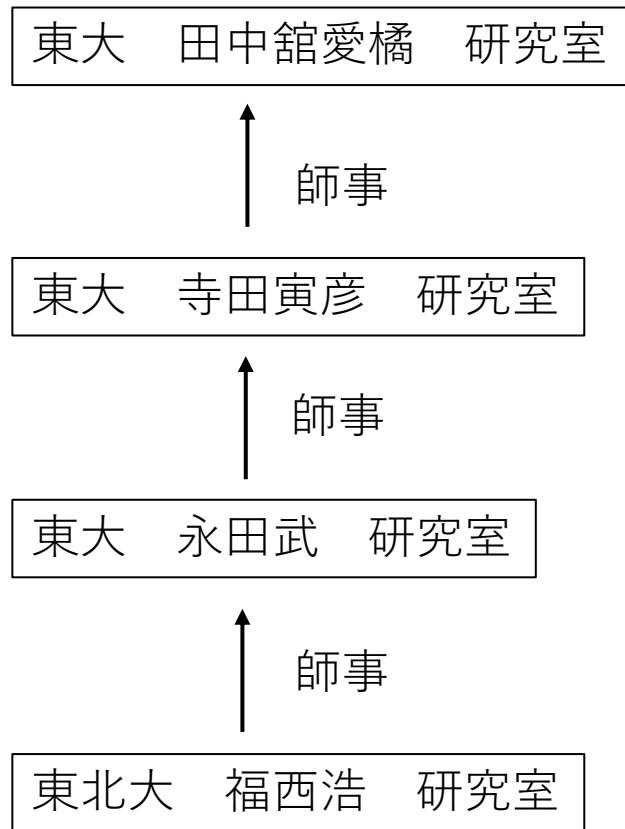
SGEPSS2024総会@極地研

椿先生の講演メモ：「忍術でもええで」（西堀先生）＝目的は絶対、手段は様々という意味

田中舘賞を賜り、ありがとうございます

- 推薦して頂いた藤田茂先生、ありがとうございました
 - 本研究のきっかけとなった、柿岡地磁気観測所100周年記念のCA研究会（2013年1月@柿岡）に誘って頂いたのも藤田先生でした
- 奇しくも最大規模の磁気嵐が5月に発生し、日本各地でもオーロラが見られ、記念すべき年になりまして、それも嬉しく思います
 - 菊池崇先生のいう巨大磁気嵐の「マッカ」なオーロラというのは、どうやら本当のことのようだとリアルタイムで感じています
- 寺田寅彦ファンとしても、「田中舘」先生の名のついた賞ということで、感激しております

先生の先生の…

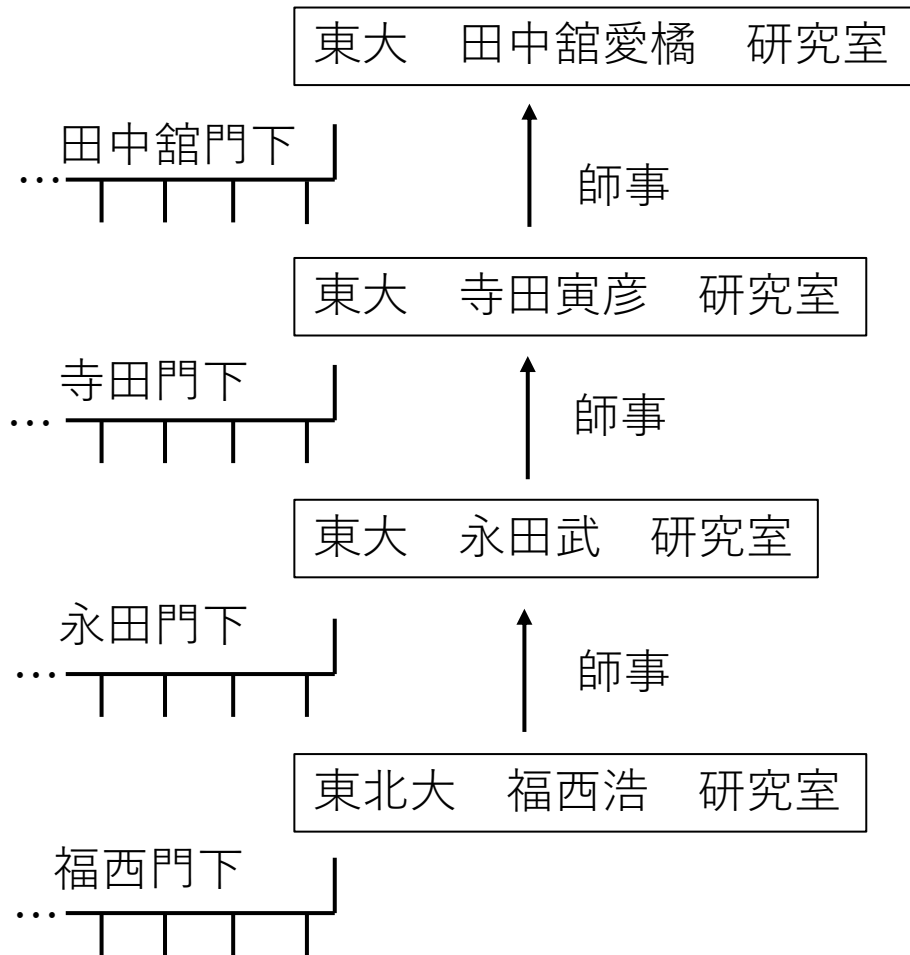


1910年頃のこと、ドイツに留学経験のある寺田寅彦がとある会議での愛橘のドイツ語の発言について意見を述べたことが有った。寺田は「館先生、勢いは宜しいのですが、少々乱暴なドイツ語ではありませんか」と告げた。これに対して愛橘は「聞かれた相手に直ちに答えようと思ったら、テニヲハなどにかまっておられるか。今やらなければ殺されると思え」と答えたという。後に寺田は「館先生はいつも日本を背負って、死ぬ気でやってらっしゃるのだ」と振り返った

「私は寺田先生のお葬式の時に学生で受け付けをやった最後の弟子です」

「永田研究室に所属していた博士課程2年の時に念願の第11次南極地域観測隊の越冬隊員になり」

先生の先生の…



1910年頃のこと、ドイツに留学経験のある寺田寅彦がとある会議での愛橘のドイツ語の発言について意見を述べたことが有った。寺田は「舘先生、勢いは宜しいのですが、少々乱暴なドイツ語ではありませんか」と告げた。これに対して愛橘は「聞かれた相手に直ちに答えようと思ったら、テニヲハなどにかまっておられるか。今やらなければ殺されると思え」と答えたという。後に寺田は「舘先生はいつも日本を背負って、死ぬ気でやってらっしゃるのだ」と振り返った

「私は寺田先生のお葬式の時に学生で受け付けをやった最後の弟子です」

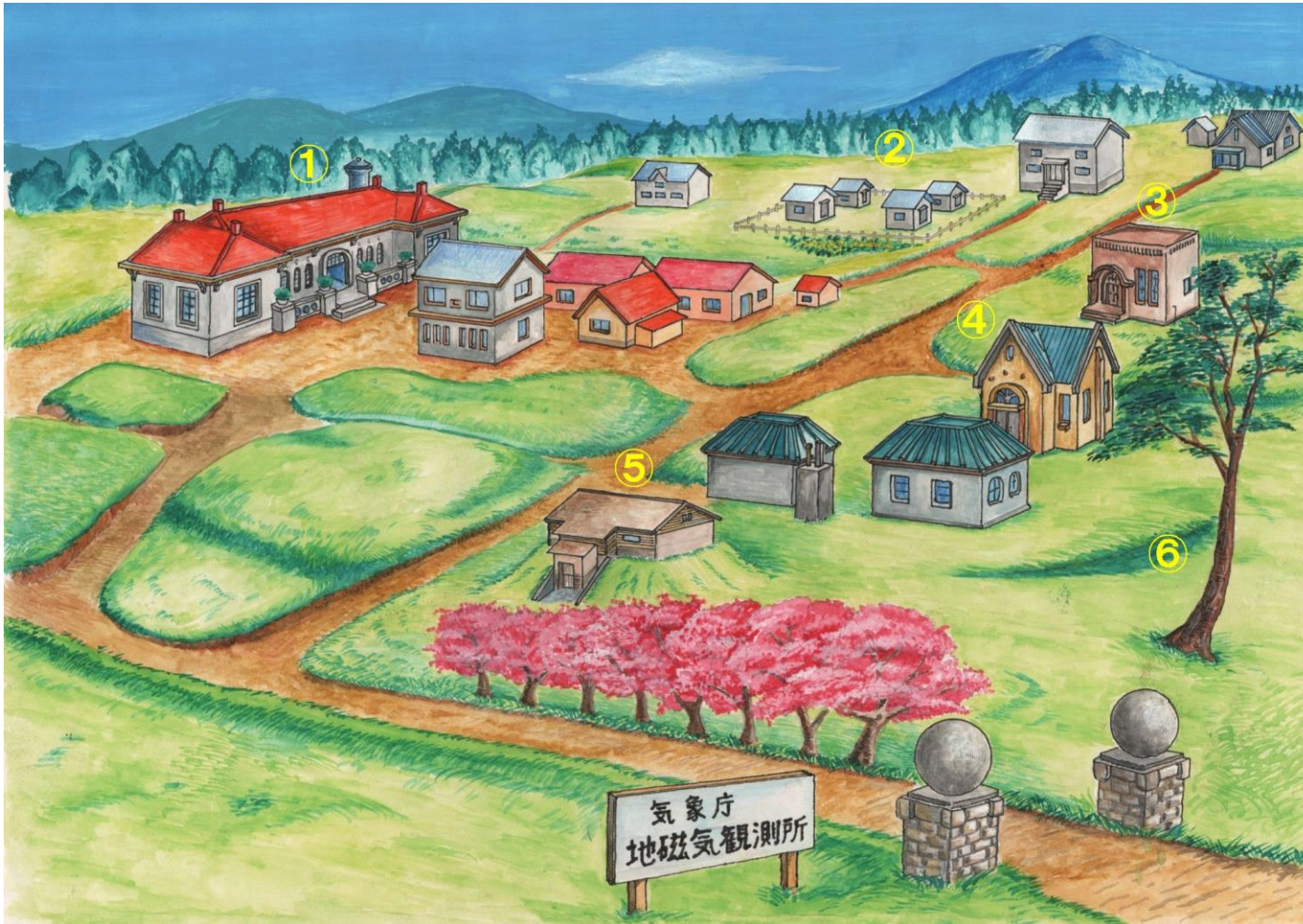
「永田研究室に所属していた博士課程2年の時に念願の第11次南極地域観測隊の越冬隊員になり」





平成12年3月14日 田村忠義さんご退官記念会 於 KKRホテル仙台

幸運その1：柿岡百周年で現地見学



「柿岡の地で地磁気観測が始められたのは大正2年(1913年)のことです。これは、それまで東京の中央气象台(気象庁の前身)で行われていた地磁気観測が市内電車(直流)の開通により続けられなくなったためでした。地磁気観測に適した土地としてこの地が選ばれた際には、物理学者として名高い寺田寅彦が大きな役割を果たしました。柿岡での地磁気観測は、その後、戦争中も含め休みなく続けられています。」

[ホーム](#) > [観測資料](#) > 過去の主な磁気嵐（柿岡）

過去の主な磁気嵐（柿岡）

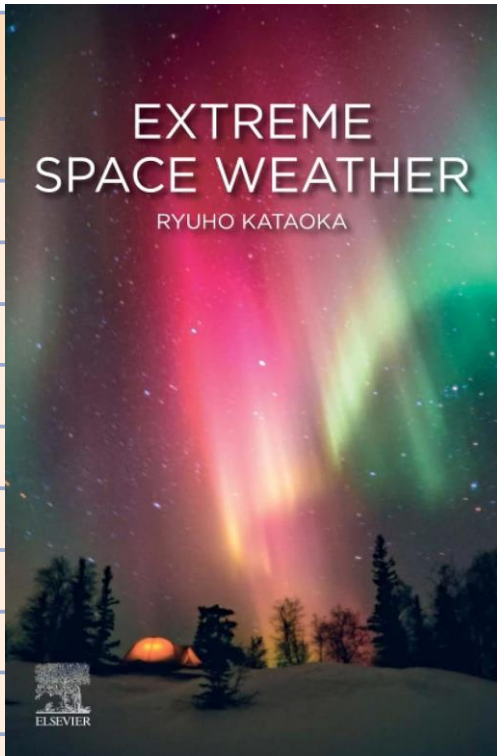
1924年以降に柿岡で観測された磁気嵐の中から、地磁気の水平成分の変動幅（較差）が300nTを越す非常に大きなものについて、大きさ順にリストアップしています。

順位	起時（UTC）	終時（UTC）	変動幅（較差）（nT）			急始変化量 水平成分 （nT）
	年 月 日 時:分	月 日 時	水平成分	偏角	鉛直成分	
1	1941 07 04 20.8	07 06 18	>700※	333	132	-（緩始）
2	1940 03 24 13:48	03 26 08	661	196	322	73
3	1989 03 13 01:27	03 15 22	644	351	205	43
4	1982 07 13 16:17	C	630	297	381	114
5	1958 02 11 01:26	02 13 06	617	469	237	62

順位	起時 (UTC)	終時 (UTC)	変動幅 (較差) (nT)			急始変化量 水平成分 (nT)
	年 月 日 時:分	月 日 時	水平成分	偏角	鉛直成分	
1	1941 07 04 20.8	07 06 18	>700※	333	132	- (緩始)
2	1940 03 24 13:48	03 26 08	661	196	322	73
3	1989 03 13 01:27	03 15 22	644	351	205	43
4	1982 07 13 16:17	C	630	297	381	114
5	1958 02 11 01:26	02 13 06	617	469	237	62
6	1941 09 18 04:11	09 20 18	604	298	165	20
7	1941 03 01 03:57	03 02 23	>560※	265	210	31
8	1959 07 15 08:02	07 17 02	533	174	159	46
9	2024 05 10 17:05	05 14 00	532	282	326	78
10	1967 05 25 12:35	05 29 20	509	138	192	91
11	1938 04 16 05:48	04 18 18	508	316	223	117
12	1991 03 24 03:41	03 27 20	503	204	199	202
13	1938 01 22 02:42	01 23 24	490	159	178	63
14	1957 09 13 00:45	09 14 16	486	224	163	25
15	1928 07 07 23:14	07 11 10	486	321	241	8

16	2001 03 31 00:52	04 01 15	477	319	169	67
17	1958 07 08 07:48	07 10 11	472	196	137	116
18	1946 07 26 18:47	07 28 07	462	305	221	114
19	2004 11 07 18:27	C	460	200	161	42
20	1992 05 09 19:58	05 12 07	426	209	109	101
21	2003 10 29 06:11	C	423	279	154	80
22	1960 11 12 13:48	11 14 23	417	239	252	41
23	2003 11 20 08:02	11 21 24	415	189	164	28
24	1946 03 28 06:35	03 29 23	>412※	393	245	81
25	1949 01 24 18:27	C	407	149	206	52
26	2005 05 15 02:38	05 16 18	401	175	136	39
27	2000 07 15 14:36	07 16 18	386	179	182	140
28	1960 04 30 12:13	05 01 20	380	150	174	124
29	1991 11 08 06:48	11 10 03	372	237	159	15
30	1949 05 12 06:27	05 15 18	>368※	158	167	65
31	1950 03 19 05:44	03 19 23	365	163	129	27
32	1972 08 05 14:00	08 07 01	359	332	230	54
33	2004 11 09 18:49	11 12 24	359	206	126	53

順位	起時 (UTC)	終時 (UTC)
	年 月 日 時:分	月 日 時
1	1941 07 04 20.8	07 06 18
2	1940 03 24 13:48	03 26 08
3	1989 03 13 01:27	03 15 22
4	1982 07 13 16:17	C
5	1958 02 11 01:26	02 13 06
6	1941 09 18 04:11	09 20 18
7	1941 03 01 03:57	03 02 23
8	1959 07 15 08:02	07 17 02
9	2024 05 10 17:05	05 14 00
10	1967 05 25 12:35	05 29 20
11	1938 04 16 05:48	04 18 18
12	1991 03 24 03:41	03 27 20
13	1938 01 22 02:42	01 23 24
14	1957 09 13 00:45	09 14 16
15	1928 07 07 23:14	07 11 10

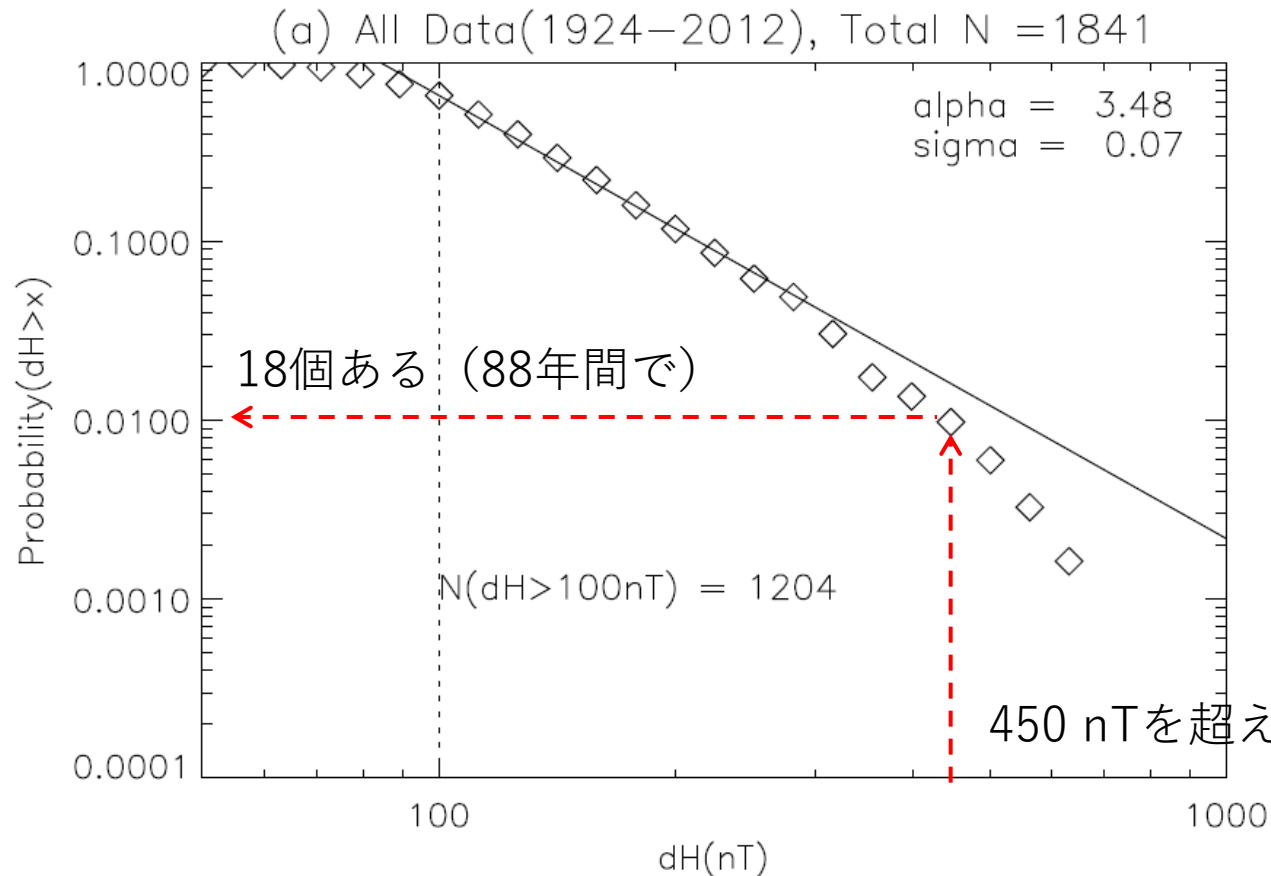


509	138	192
508	316	223
503	204	199
490	159	178
486	224	163
486	321	241

Table 2.6 Outstanding magnetic storms from 1932.				
Extreme GMD (Kp = 9) events (1932/1–2020/12)				
Year	Month	Day	Hour	Dst peak (nT)
1938	4	16	6	“Lanzerotti Storm”
1940	3	24	15,18	
1941	3	1	15	
1941	7	5	12	
1941	9	19	3	
1946	7	27	6	
1946	9	22	12	
1957	9	4	15	–324
1958	2	11	0	–426
1958	7	8	15	–330
1959	7	15	15	–429
1960	4	30	15	–325
1960	10	7	0	–287
1960	11	13	6,9	–339
1967	5	25	21,24	–387
1970	3	8	18	–284
1972	8	4	21	–118
1982	7	13	21	–325
1982	7	14	0	–325
1986	2	8	18	–307
1989	3	13	21,24	–589
2000	7	15	18	–300
2003	10	29	6	–353
2003	10	30	18,21	–383
2024	5	11	0,9	–412

最大級の磁気嵐のことをもっと知りたい

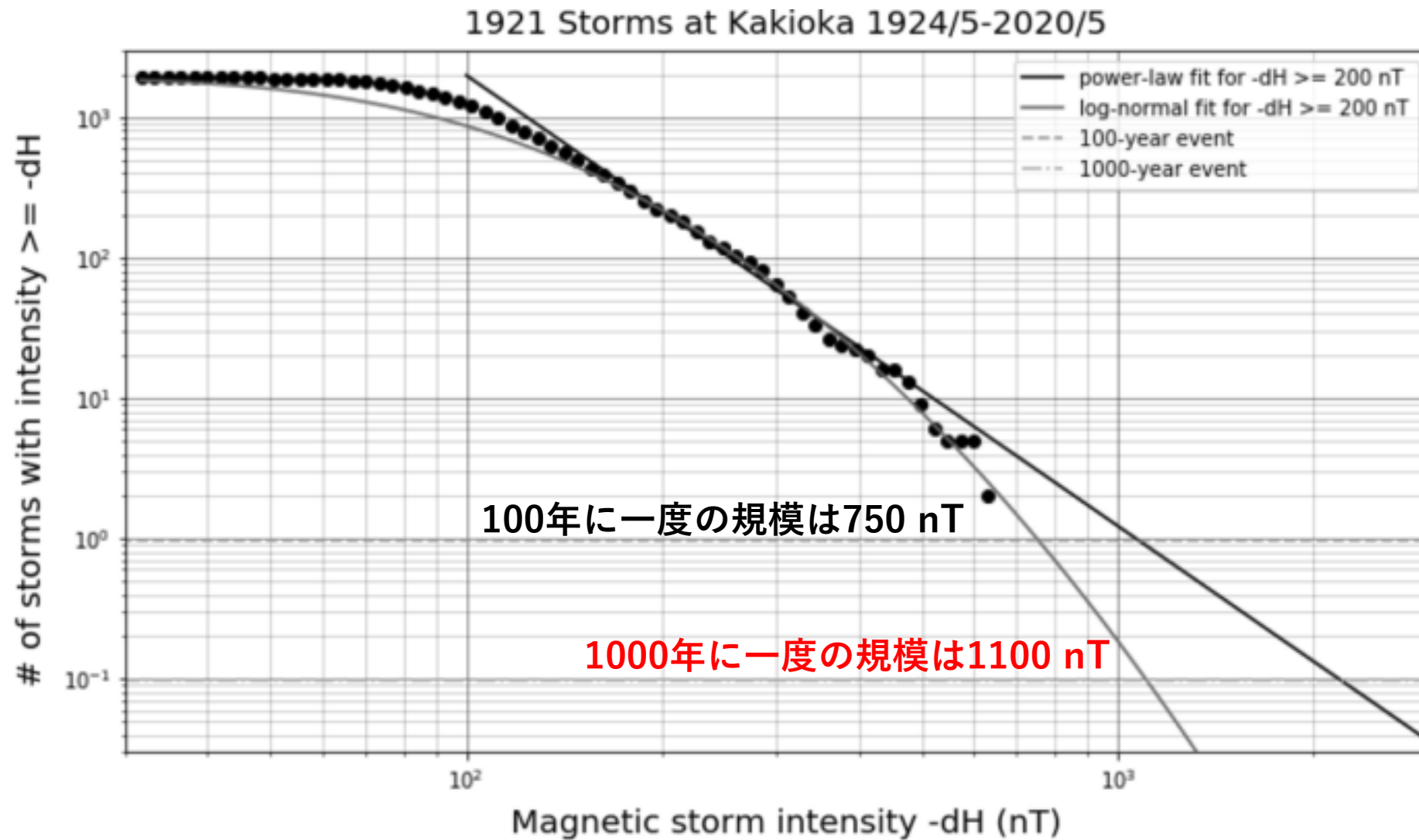
- まずは、数を数えてみる



Kataoka (2013, Space Weather)
* 初の単著論文

ベキ乗則のフィットには無理がある…

- 最大級の磁気嵐は、べきでなく、対数正規分布的に数が減る？



「ステイホーム」で単著の続編を執筆

Earth, Planets and Space

About [Articles](#) Submission Guidelines

Submit manuscript 

Full paper | [Open access](#) | Published: 03 September 2020

Extreme geomagnetic activities: a statistical study

[Ryuho Kataoka](#) 

[Earth, Planets and Space](#) **72**, Article number: 124 (2020) | [Cite this article](#)

189k Accesses | **13** Citations | **69** Altmetric | [Metrics](#)

↑ 余談ですが、EPS誌はアクセス数がバグっている可能性がありますでしょうか。要調査？

あまりデータがない、というハードル

- 1) 統計の「はじめ」を見る
- ほかの手立ては？
- 2) 古典籍を探る
- 3) 物理シミュレーション
- 4) 機械学習

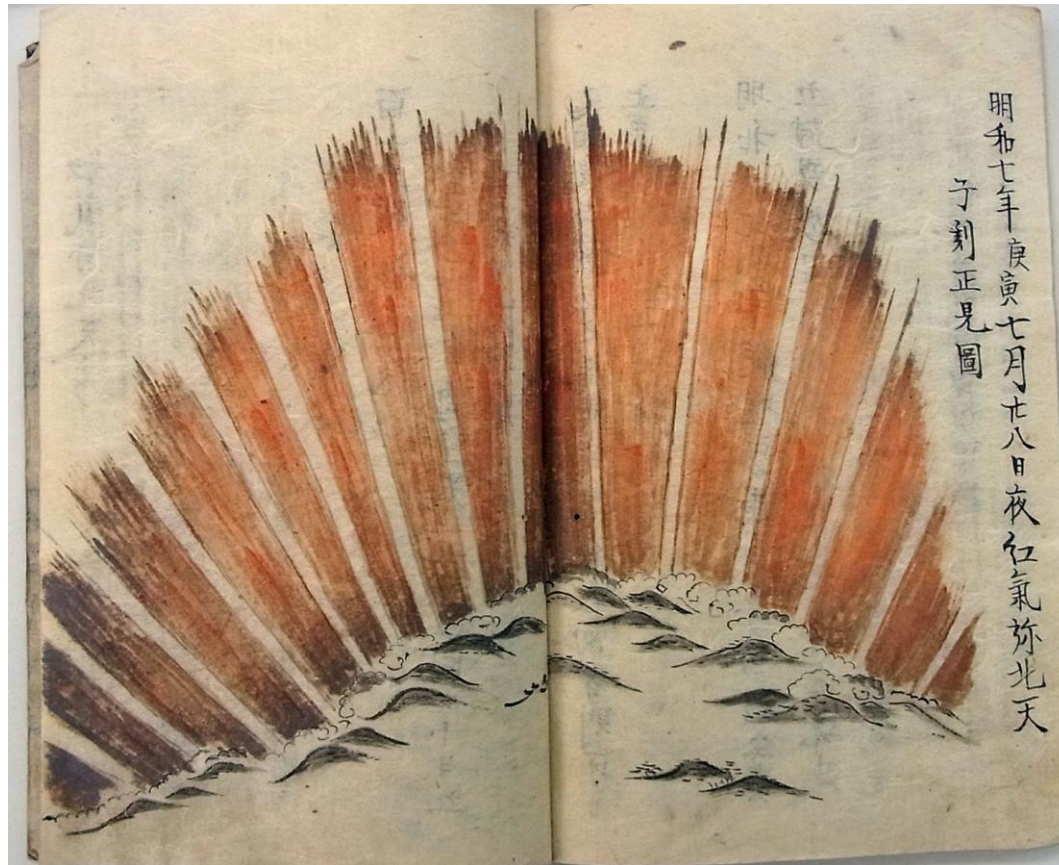
幸運その2：お隣に国文学研究資料館

- 千年に一度クラス～1000 nT規模の磁気嵐とは？
 - 日本史上最強の「赤気」事例は、明和七年七月廿八日
 - 岩橋清美さん（国文研）と『星解』の共同研究に
 - [Kataoka and Iwahashi \(2017\)](#)
- ほかにも
 - 寺島恒世先生（国文研）：『明月記』の赤気、1204年
 - [Kataoka et al. \(2017\)](#)
 - 山本和明先生（国文研）：『日本書紀』の赤気、620年
 - [Kataoka et al. \(2020\)](#)

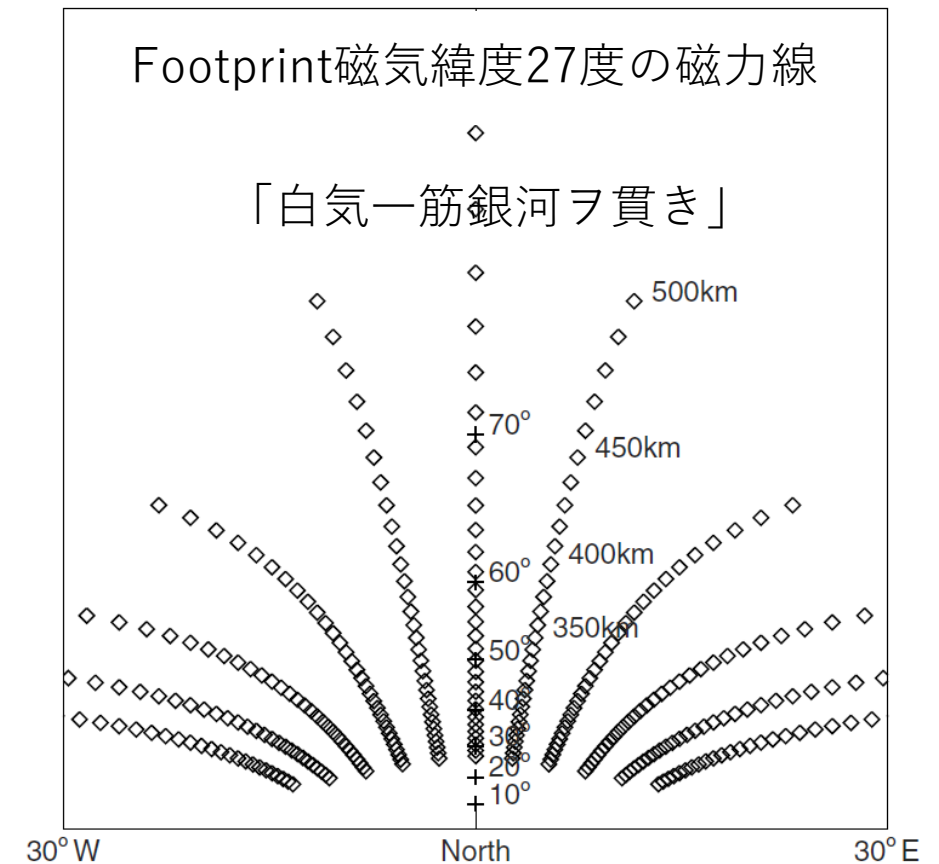


NHKラジオ番組が本に

$$Dst = -1.0 \times 10^3 \left(\frac{\varepsilon}{10\%} \right) \left(\frac{L_e}{1.26} \right)^{-3} \left(\frac{B_0}{3 \times 10^4 \text{ nT}} \right) \text{ nT}$$

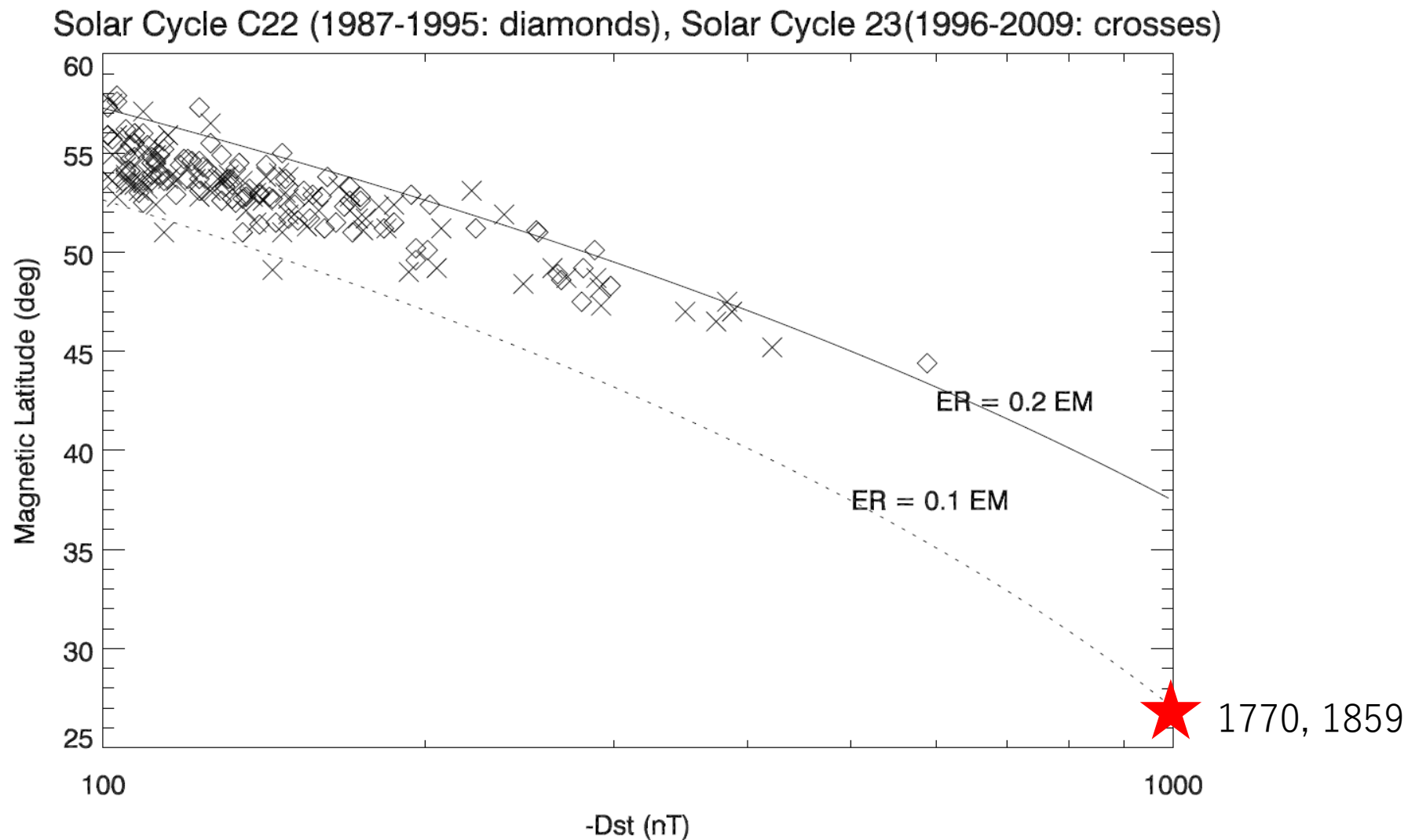


『星解』



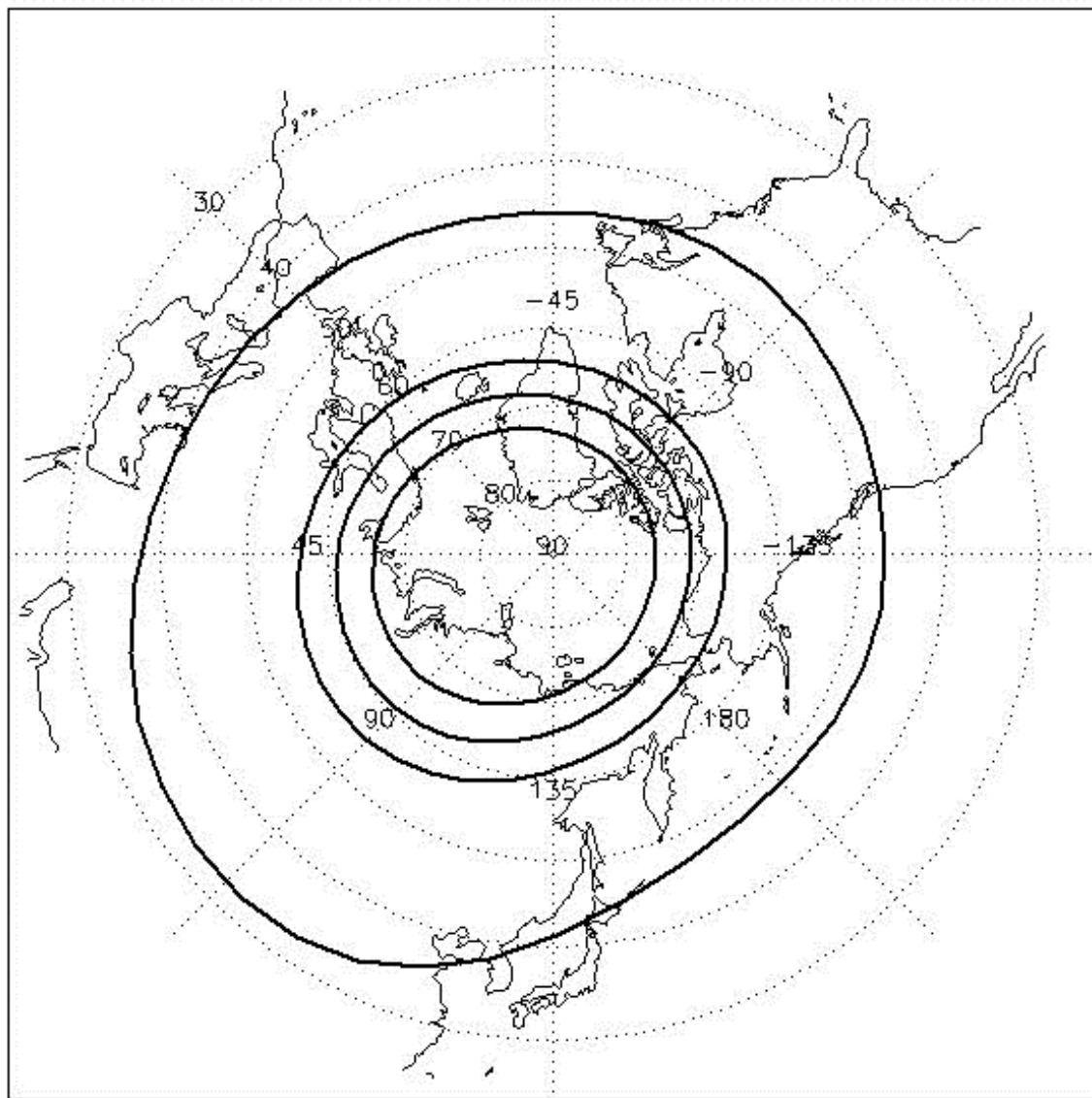
Kataoka and Iwahashi (2017)

- ε は、磁気エネルギーの何割を環電流が占めるかという値

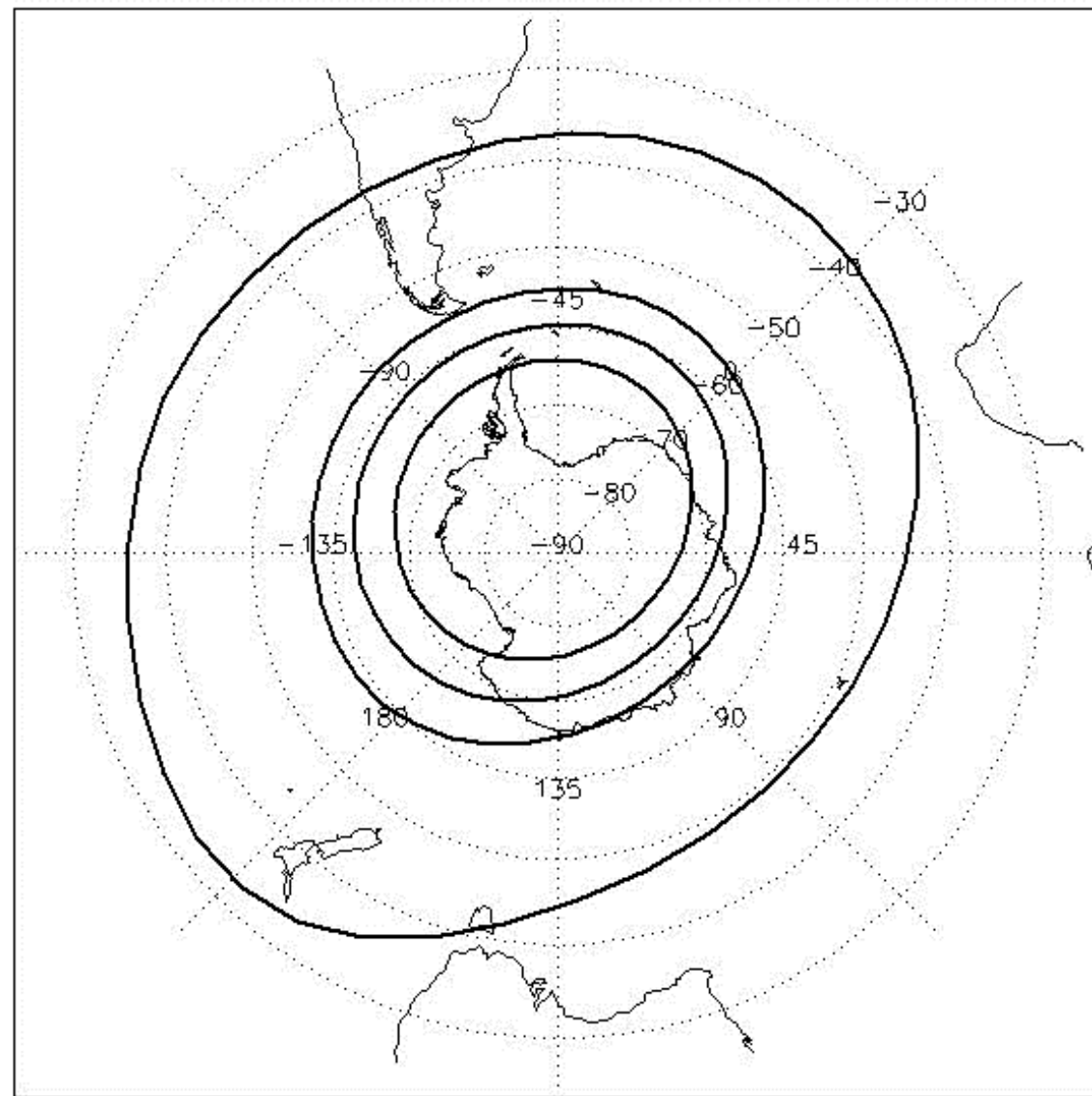


Kataoka and Nakano (2021)

BC 1000



BC 1000



Kataoka and Nakano (2021)

日本の磁気緯度が高い時代の赤気事例

『日本書紀』 620年12月30日

庚辰
廿八年秋八月掖玖人二口流來於伊豆嶋
冬十月以砂礫膏檜隈陵上則域外積土
成山仍每氏科之建大柱於土山上時倭
漢坂上直樹柱勝之高故時人号之曰大柱
直也十二月庚寅朔天有赤氣長一丈餘形
似碓尾是歲皇太子嶋太臣共議之錄天
皇記及國記臣連伴造國造百八十部并
公民等本記

日本最古の天文記録は赤気

Kataoka et al. (2020)

『明月記』 1204年2月21日、2月23日

[illegible]

十九、
病主其氣性松神性海陽
仁壽注服者多為命
車石北并具方有者氣下根
生白肺天筋達引水燒此是光白
四五云赤筋三白筋水雲水雲同是病
之新石限中中白克者之文子
石下子下也

コロナ質量放出の連発が危ないのは800年前も同じ

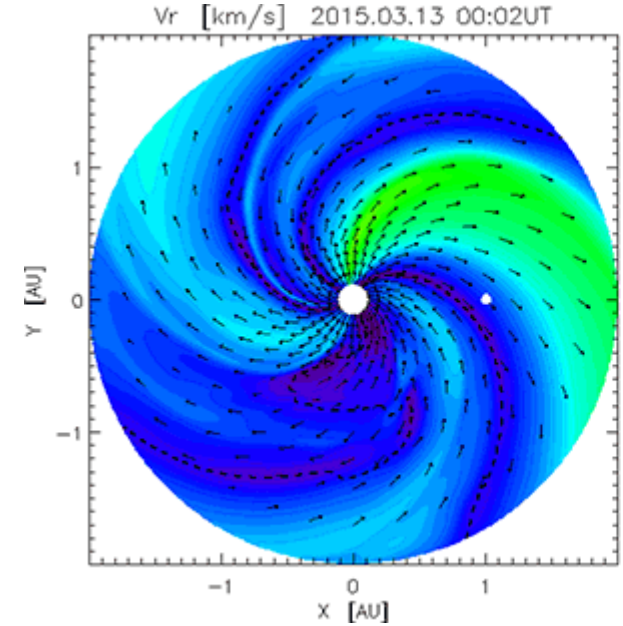
Kataoka et al. (2017)

あまりデータがない、というハードル

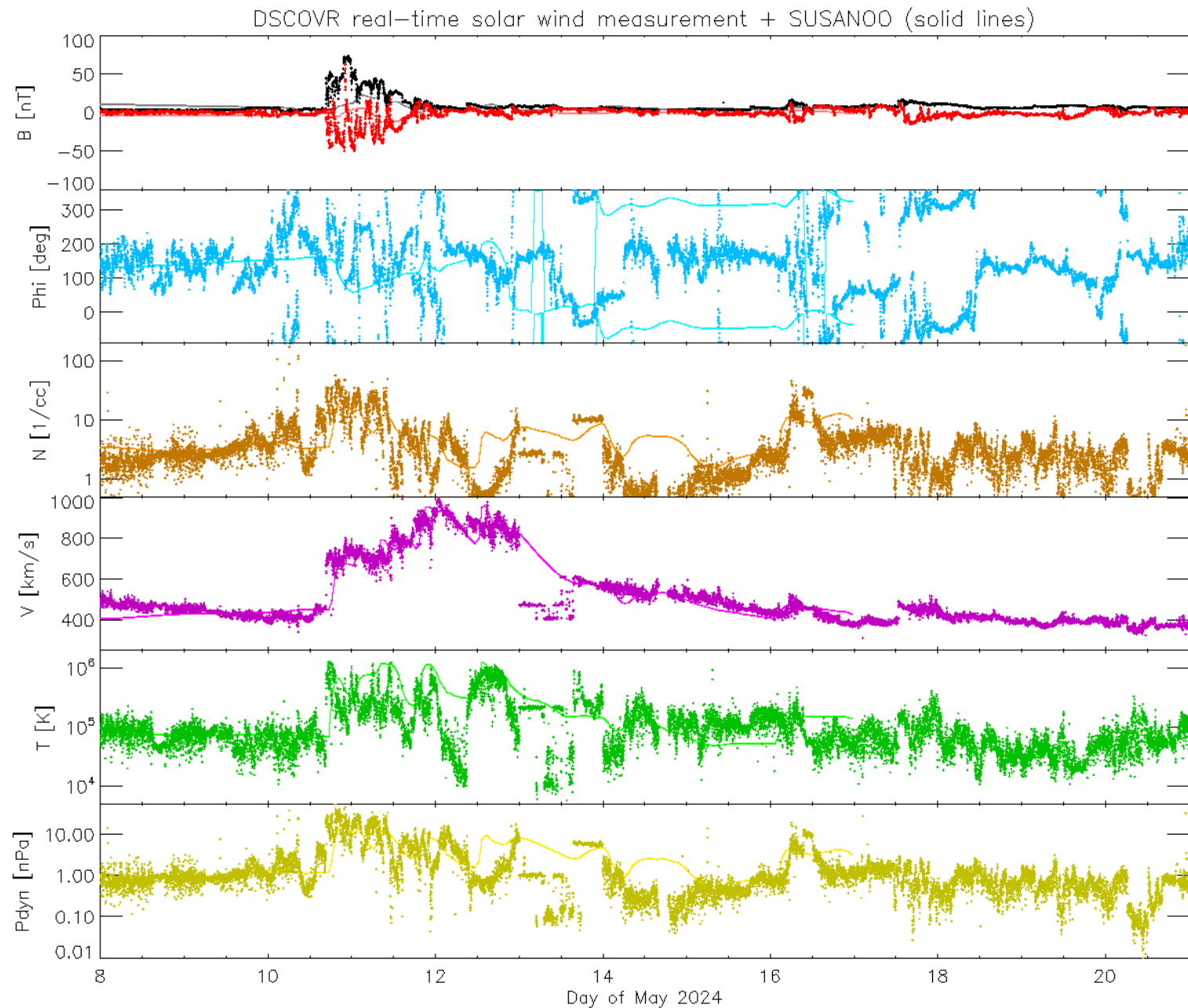
- 1) 統計の「はじめ」を見る
- 2) 古典籍を探る
- ほかの手立ては？
- 3) 物理シミュレーション
- 4) 機械学習

磁場入りCMEを放つには？

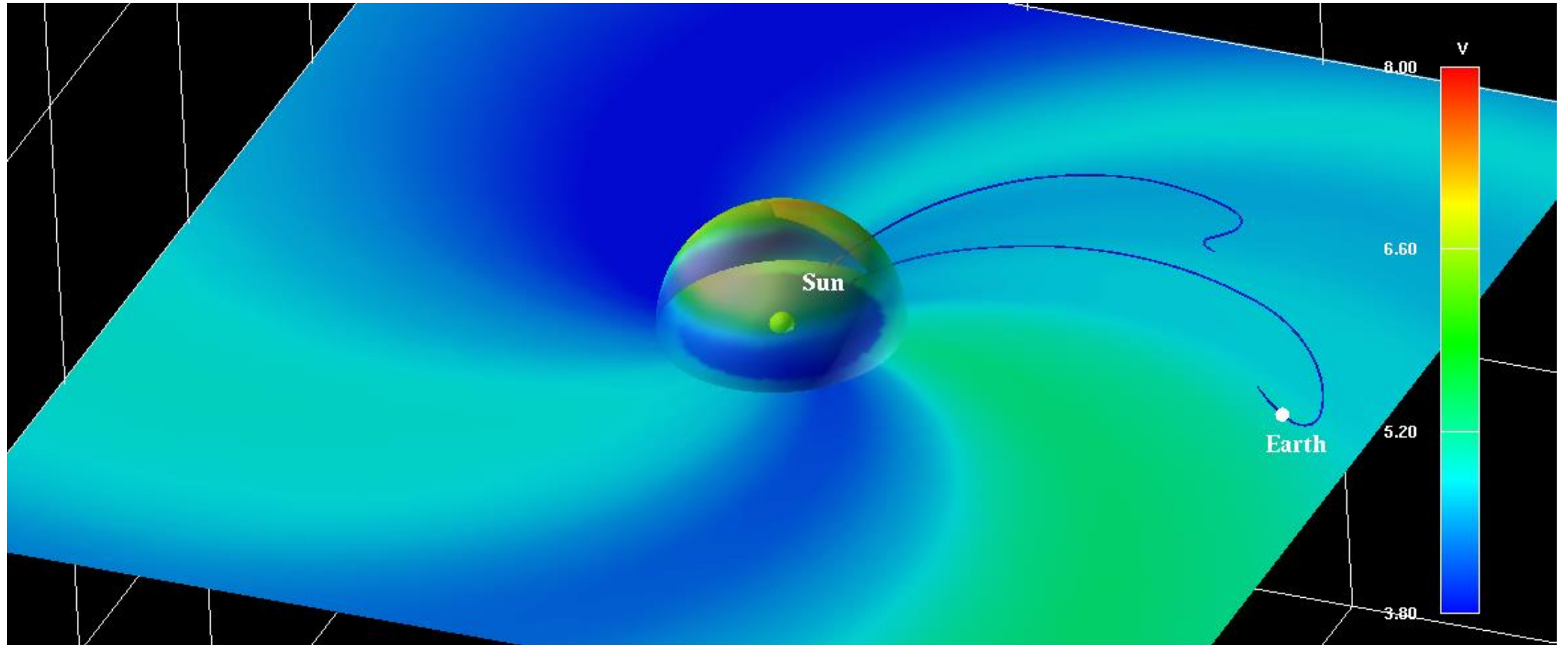
- 当初の夢（理研・基礎特研時代、2007年～2009年）
 - CMEを乱れ打つ、生きているような太陽を作りたい
 - ただしENLILのように「衝撃波」を飛ばすモデルでは嫌だ
- 球閉じ込め磁場（スフェロマック）を放つモデルを作った
 - Kataoka et al. (2009)
- プロトタイプとして役立ち、塩田大幸さんのSUSANOO-CMEへ発展
 - Shiota and Kataoka (2016)
- いま、SUSANOO-CMEモデルはNICTで「運用」されている
 - 2024年5月磁気嵐の太陽風の再現が見事（次のスライド）



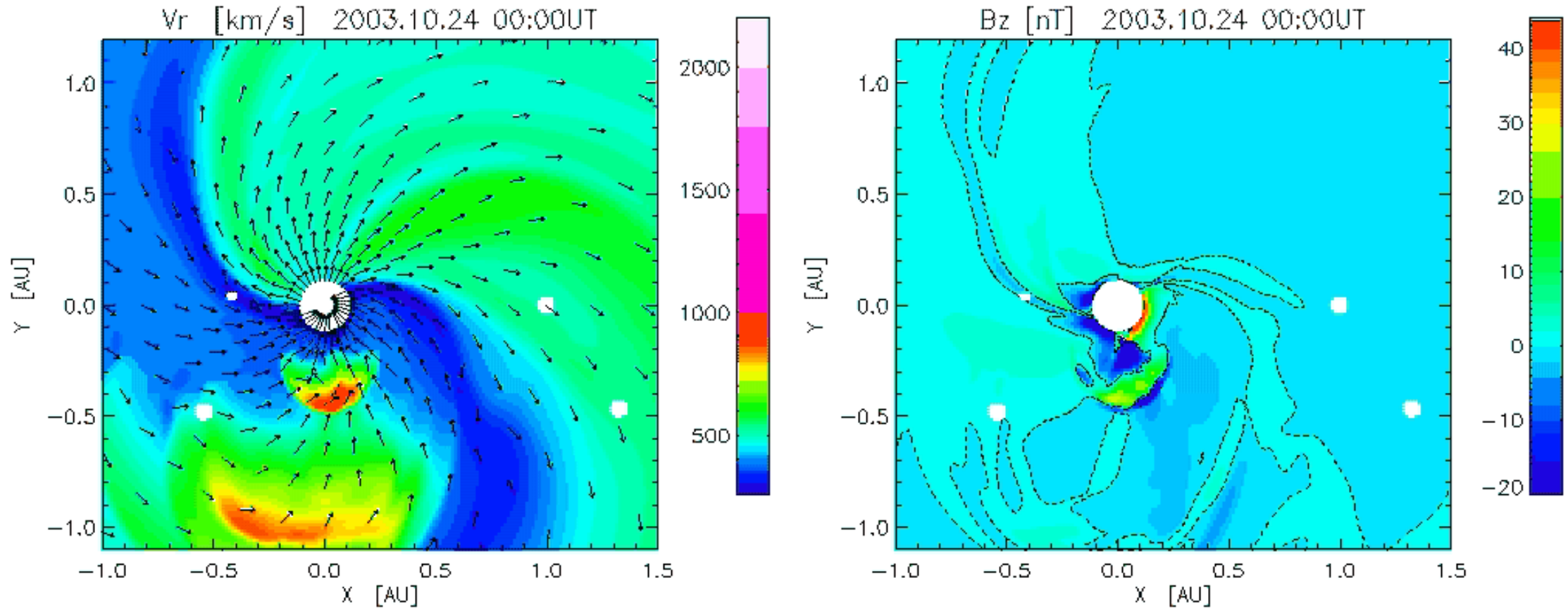
SUSANOO-CMEによるsimulation



Kataoka et al. (2009): 動画は塩田さん作



Shiota & Kataoka (2016): SUSANOO-CME



連発CMEは本質的に大事

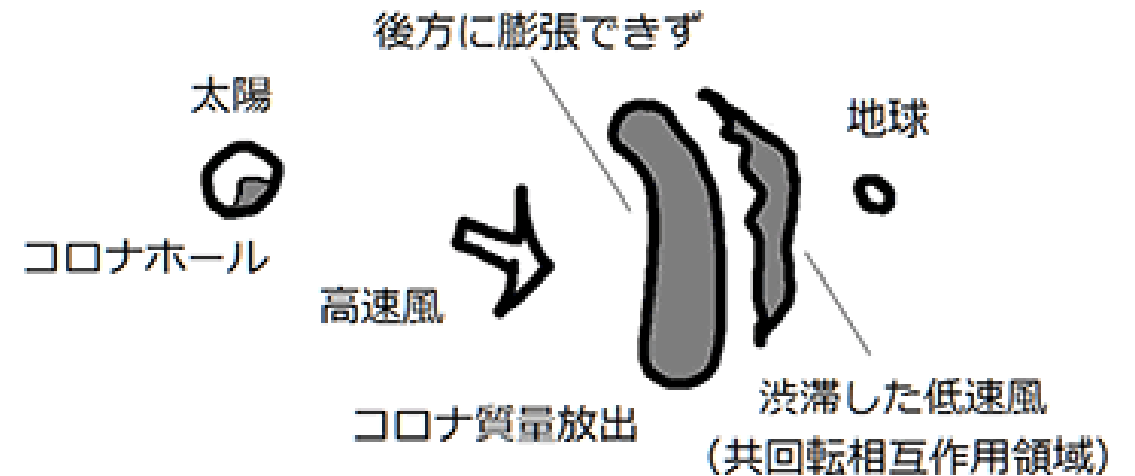
- 伝搬中に、どこまで強化されるか？は未解明問題

2006年12月13日の磁気嵐の原因



Kataoka et al. (2009)

2015年3月17日の磁気嵐の原因



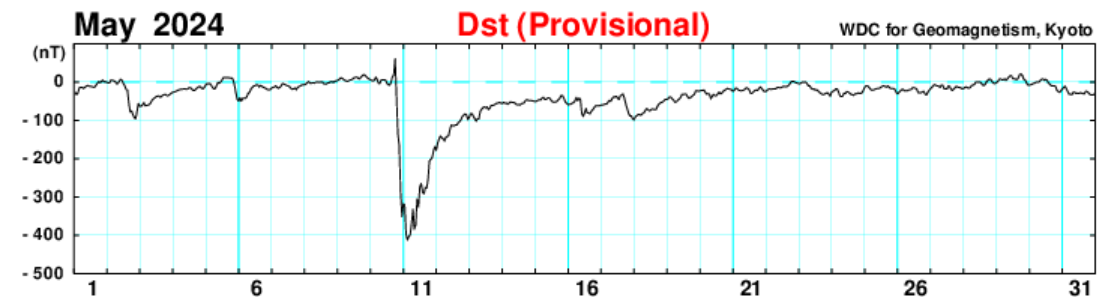
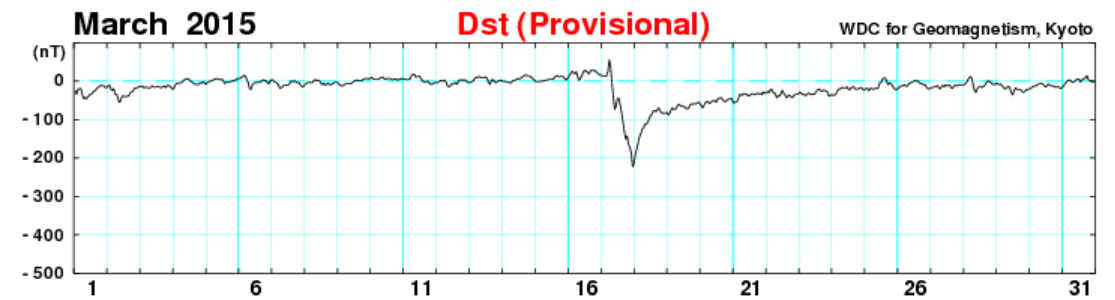
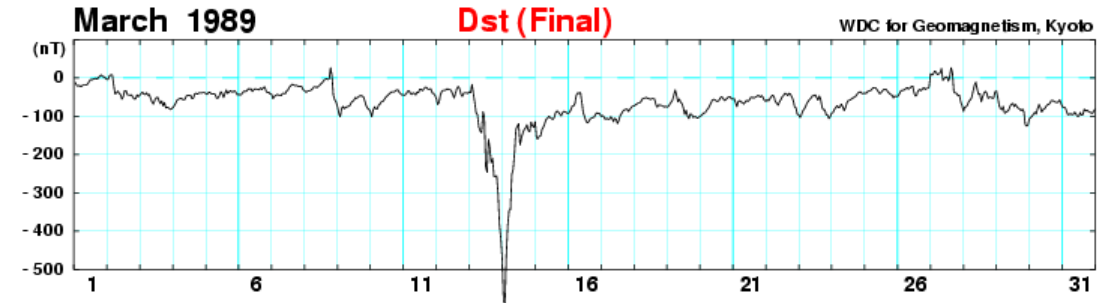
Kataoka et al. (2015)

あまりデータがない、というハードル

- 1) 統計の「はじめ」を見る
- 2) 古典籍で増やす
- 3) 物理シミュレーション
- ほかの手立ては？
- 4) 機械学習

最後の話の前置き

- サイクル22最大の磁気嵐
 - 1989/3/13-14 Dst = -589 nT
 - [Nagatsuma et al. \(2015, EPS\)](#)
- サイクル23最大の磁気嵐
 - 2003/11/20 Dst = -420 nT
 - [Kataoka et al. \(2005 GRL\)](#)
- サイクル24最大の磁気嵐
 - 2015/3/17 Dst = -222 nT
 - [Kataoka et al. \(2015 GRL\)](#)
- サイクル25最大の磁気嵐
 - 2024/5/11 Dst = -412 nT
 - [Kataoka et al. \(2024, SciRep\)](#)



幸運その3：コロナ禍のパパ友

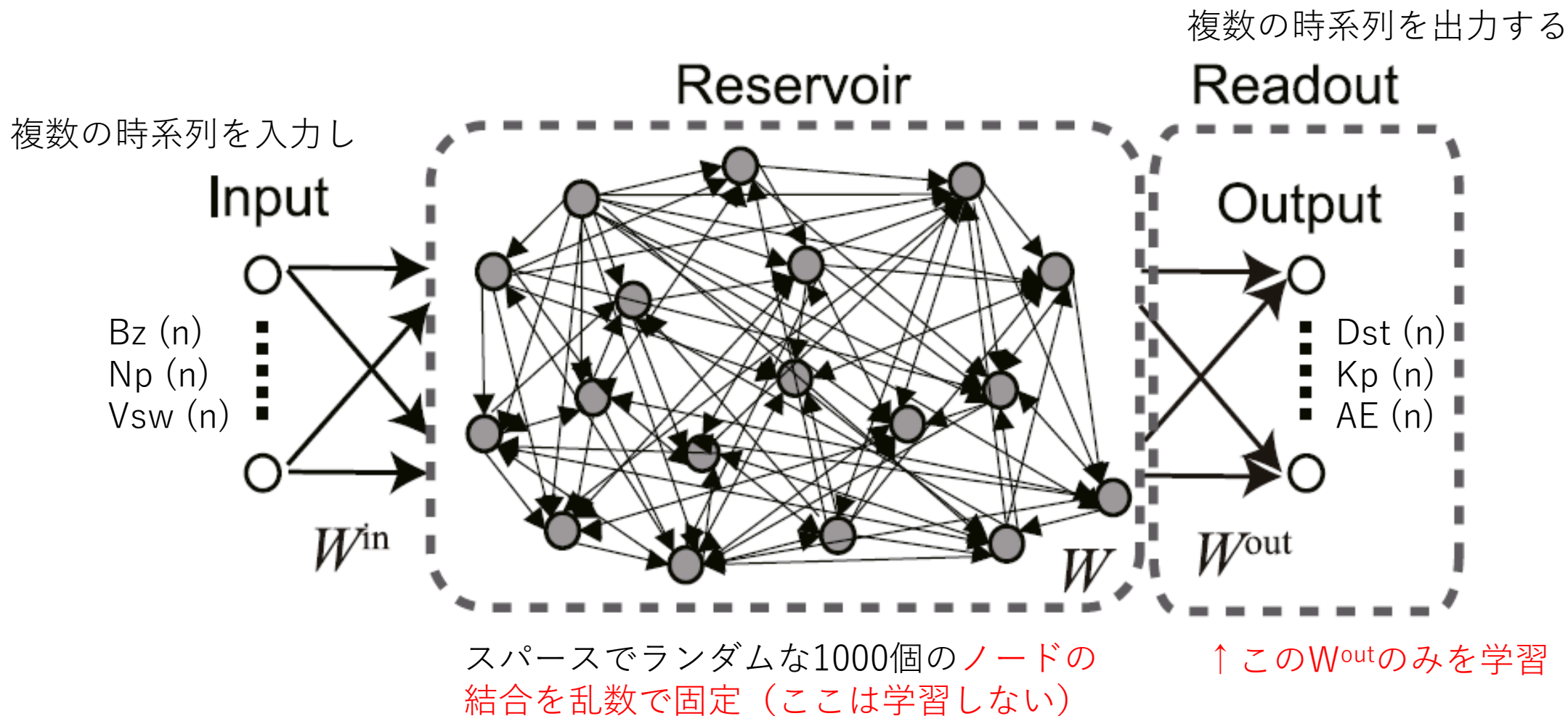
- 「リザーバー・コンピューティングという面白い手法がある」
 - RNN (Recurrent Neural Network)の一種
 - つまり、私の好物「時系列」の機械学習
- 少ない学習データでもパフォーマンスが出る
 - つまり、巨大磁気嵐なんかの研究には、なかなかいい
- 太陽風データからDstを「予測」したりするのが普通だが
 - 逆に、欠損のない地磁気活動指数の時系列データから、太陽風データの欠損を「復元」できないか？

結論から先に

- 時系列機械学習により、太陽風データの欠測している過去の磁気嵐イベントでの太陽風データを推定した。結論は3つ4つ。
- 1. 1989年3月のSBZは、95 nTと推定される。
- 2. 100年に一度のSBZは、137 nTと推定される。
- 3. $SBZ > 25$ nTのシース駆動・クラウド駆動磁気嵐の太陽風パラメータの平均プロファイルを初めて推定した。
- 4. 1957年以降データ欠損のない太陽風データ推定値を得た。

リザーバー・コンピューティング

で磁気嵐を「予測」する

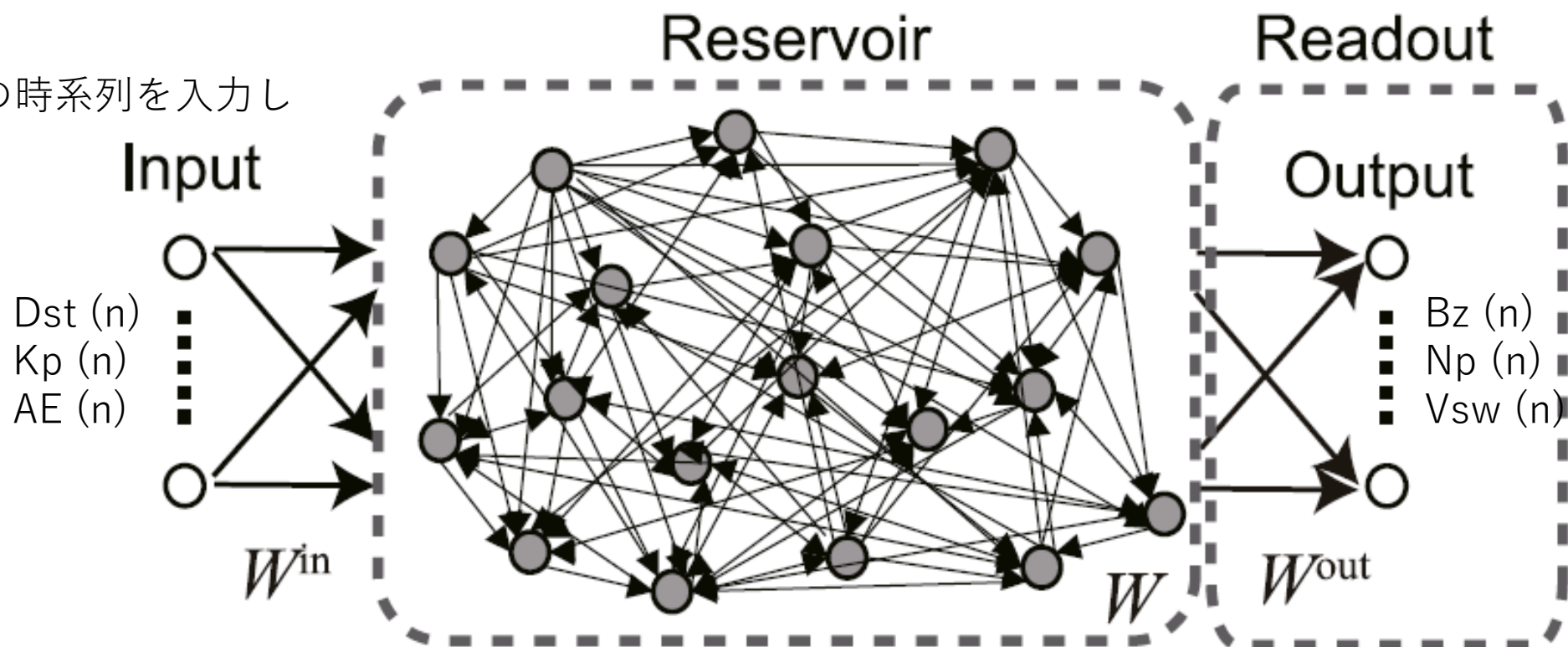


リザーバー・コンピューティング

で太陽風を「復元」する
* 時間の進みは逆にします

複数の時系列を出力する

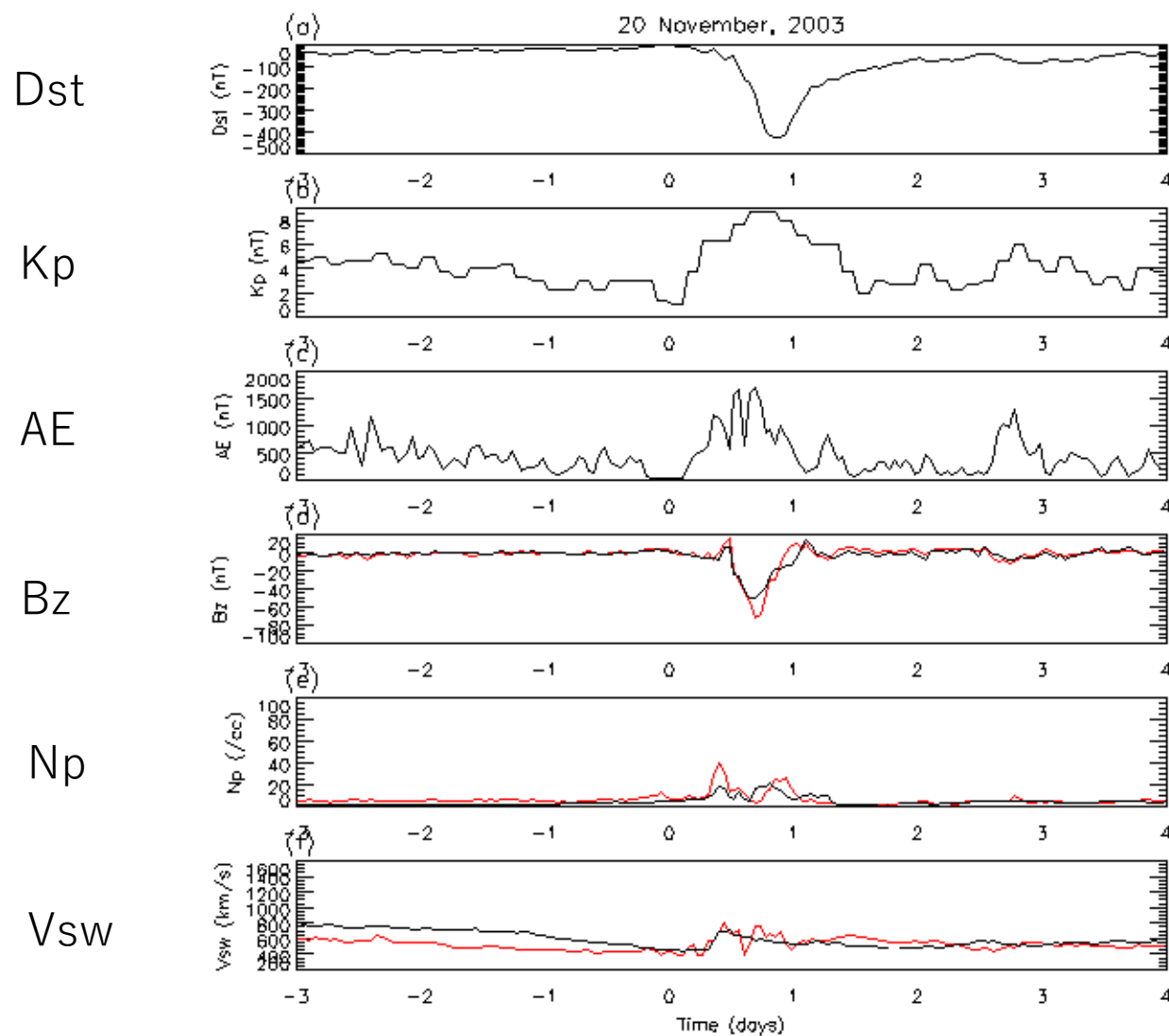
複数の時系列を入力し



スパースでランダムな1000個のノードの
結合を乱数で固定 (ここは学習しない)

↑ この W^{out} のみを学習

サイクル23最大の磁気嵐



Bz モデル予測

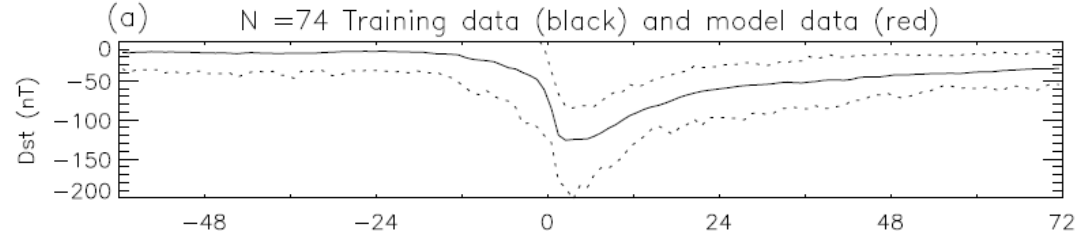
Np モデル予測

Vsw モデル予測

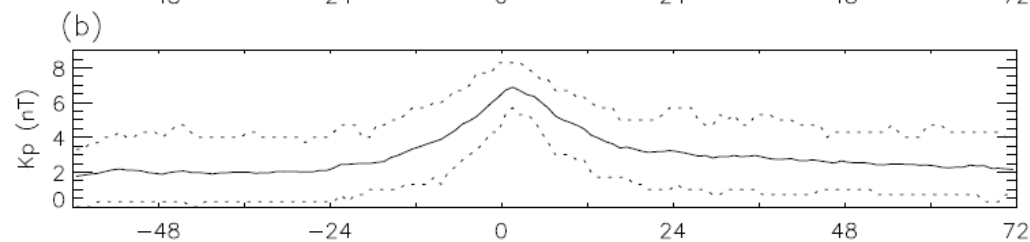
Kataoka and Nakano (2021, Geophys. Res. Lett.)

学習に使った磁気嵐
74例の重ね合わせ

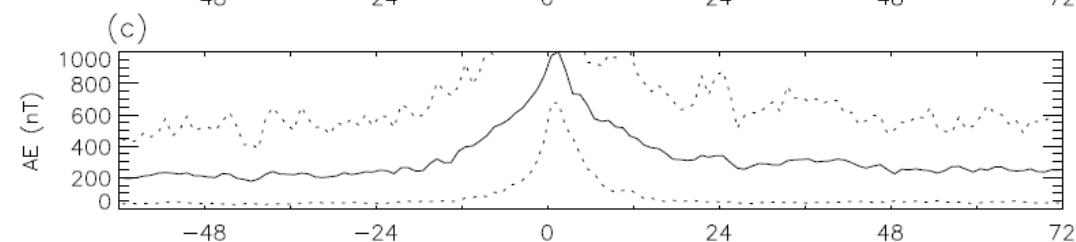
Dst



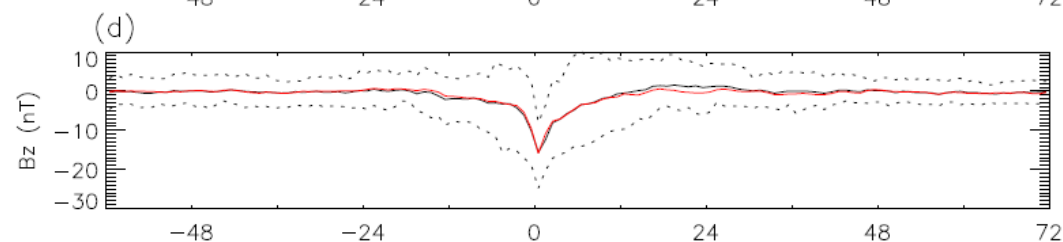
Kp



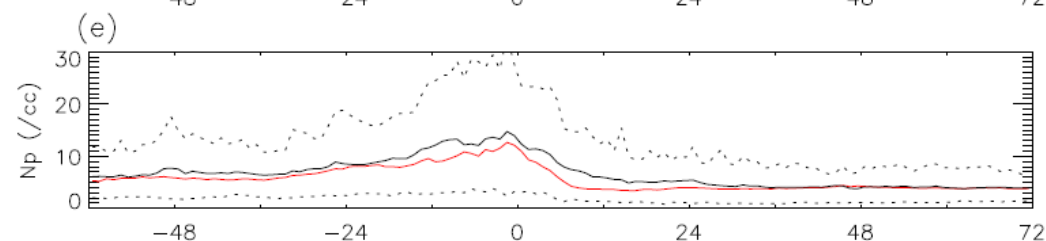
AE



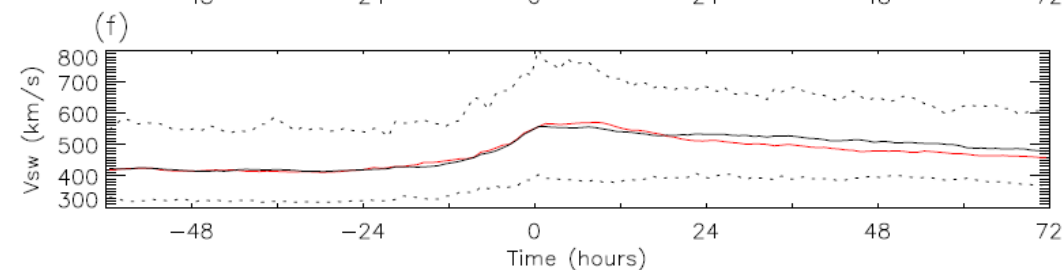
Bz



Np



Vsw



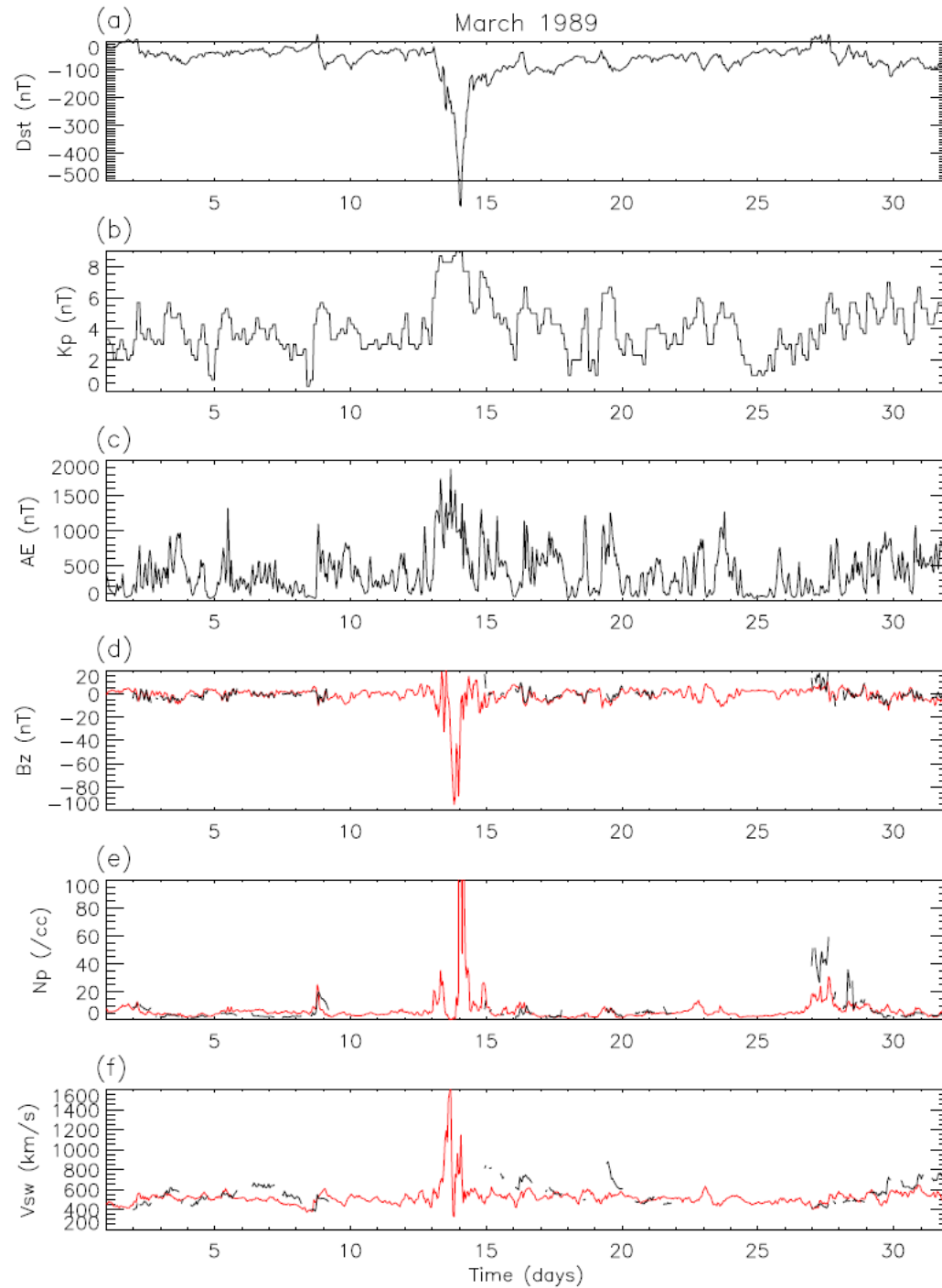
Kataoka and Nakano (2021,
Geophys. Res. Lett.)

Bz モデル予測

Np モデル予測

Vsw モデル予測

過去50年最大の磁気嵐



Kataoka and Nakano (2021,
Geophys. Res. Lett.)

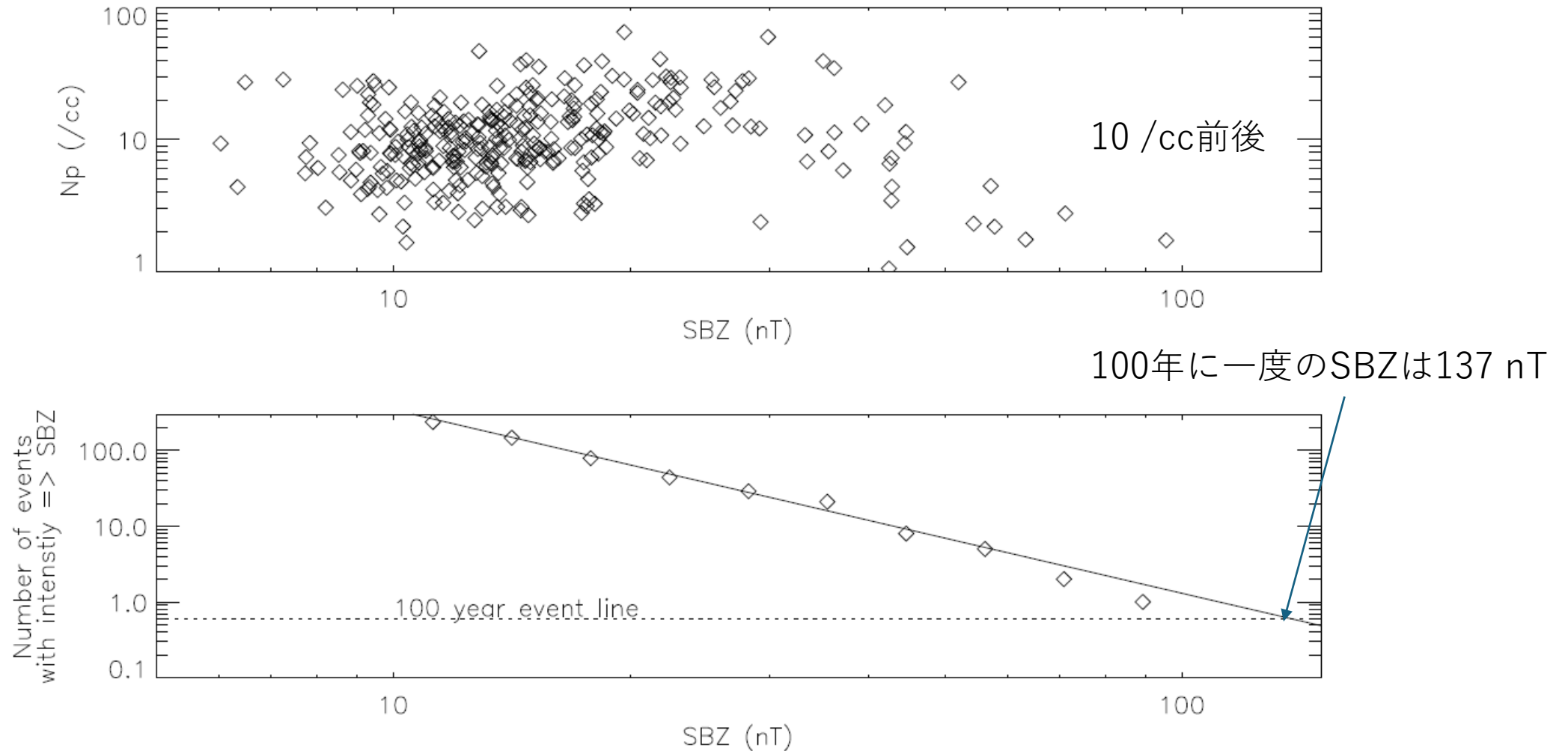
Bz モデル予測

Np モデル予測

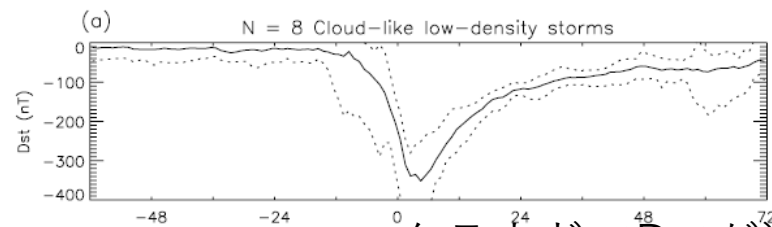
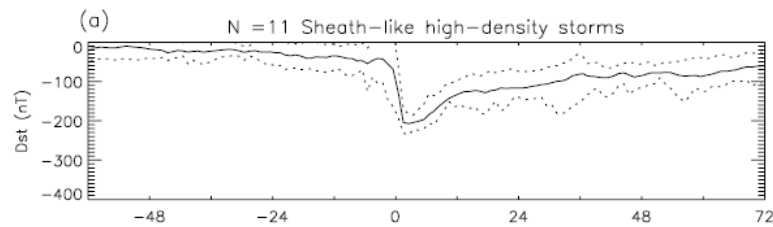
Vsw モデル予測

1957年以降のすべての磁気嵐を見ると

磁気嵐 ($Dst < -100$ nT) ピーク時のモデル N_p とモデル B_z



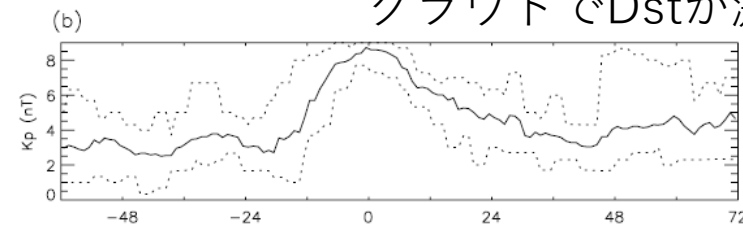
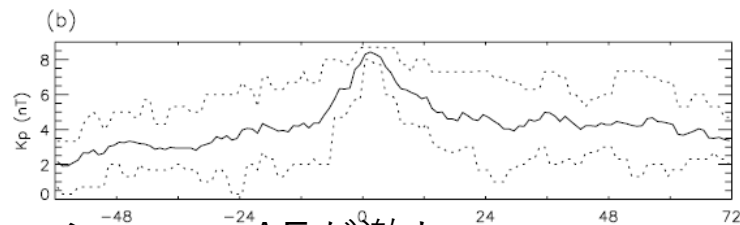
Dst



Kataoka and Nakano (2021,
Geophys. Res. Lett.)

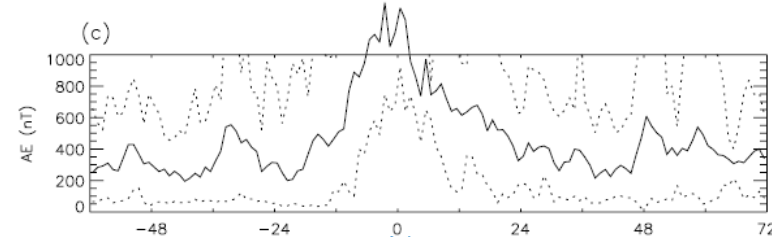
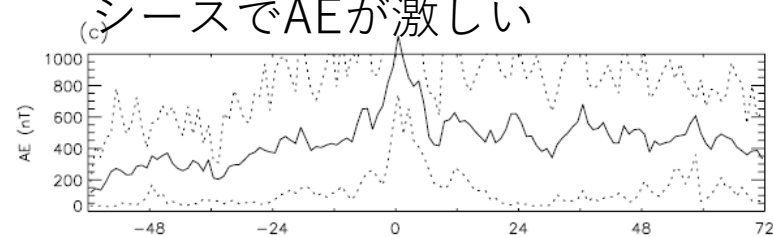
クラウドでDstが激しい

Kp



シースでAEが激しい

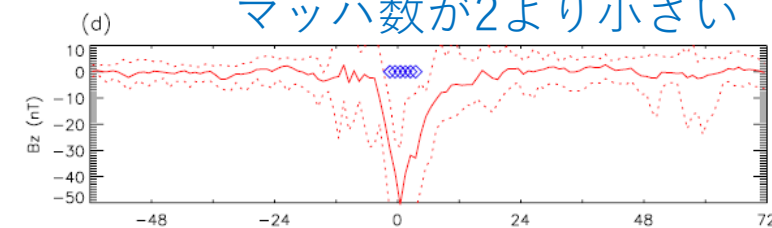
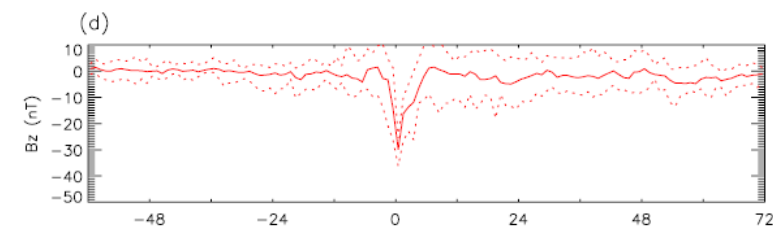
AE



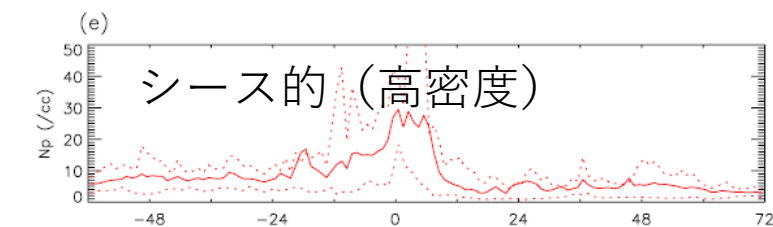
シミュレーション研究
の入力値として役立つ



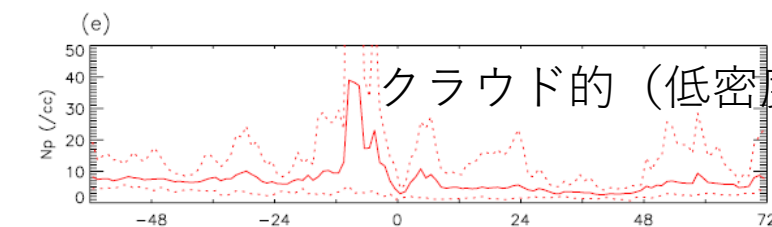
Bz モデル予測



マッハ数が2より小さい

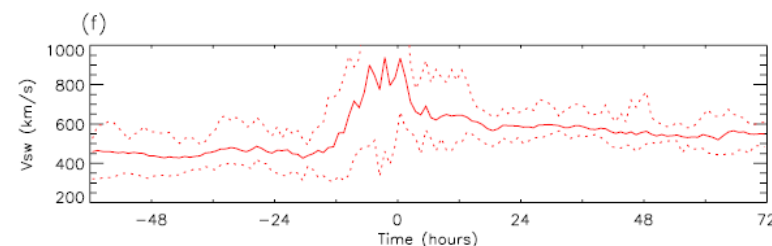
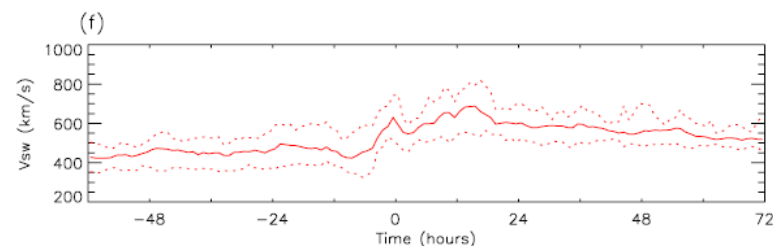


シース的 (高密度)



クラウド的 (低密度)

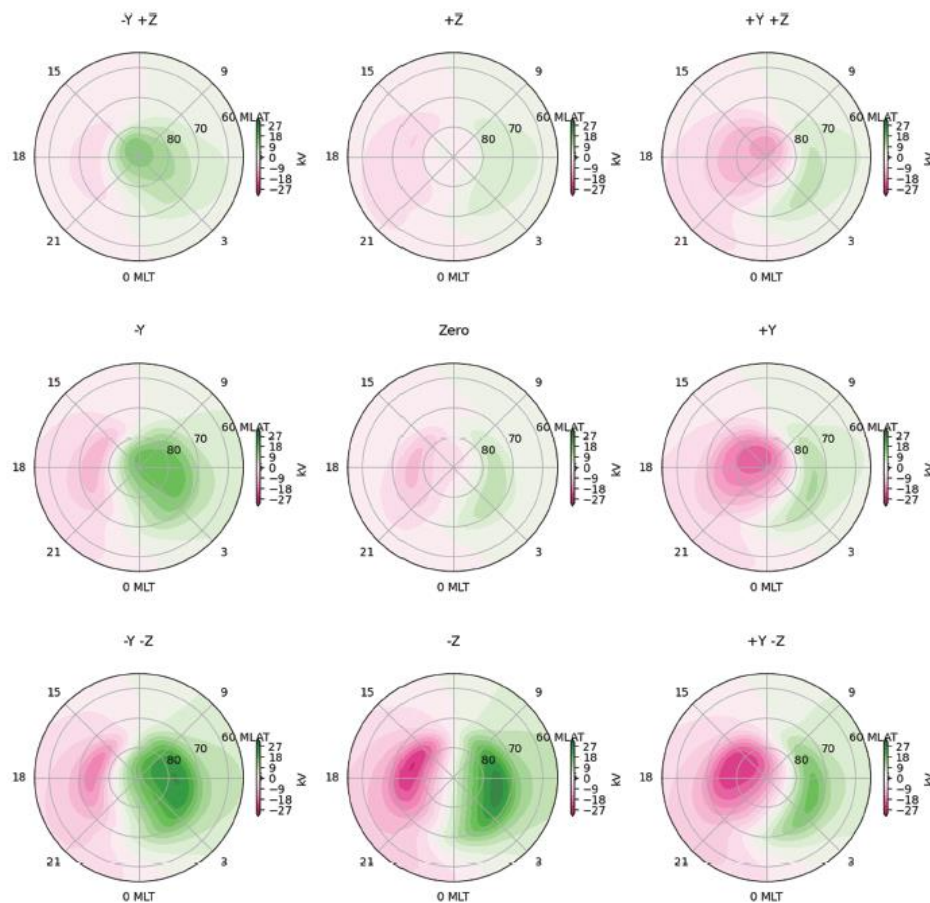
Np モデル予測



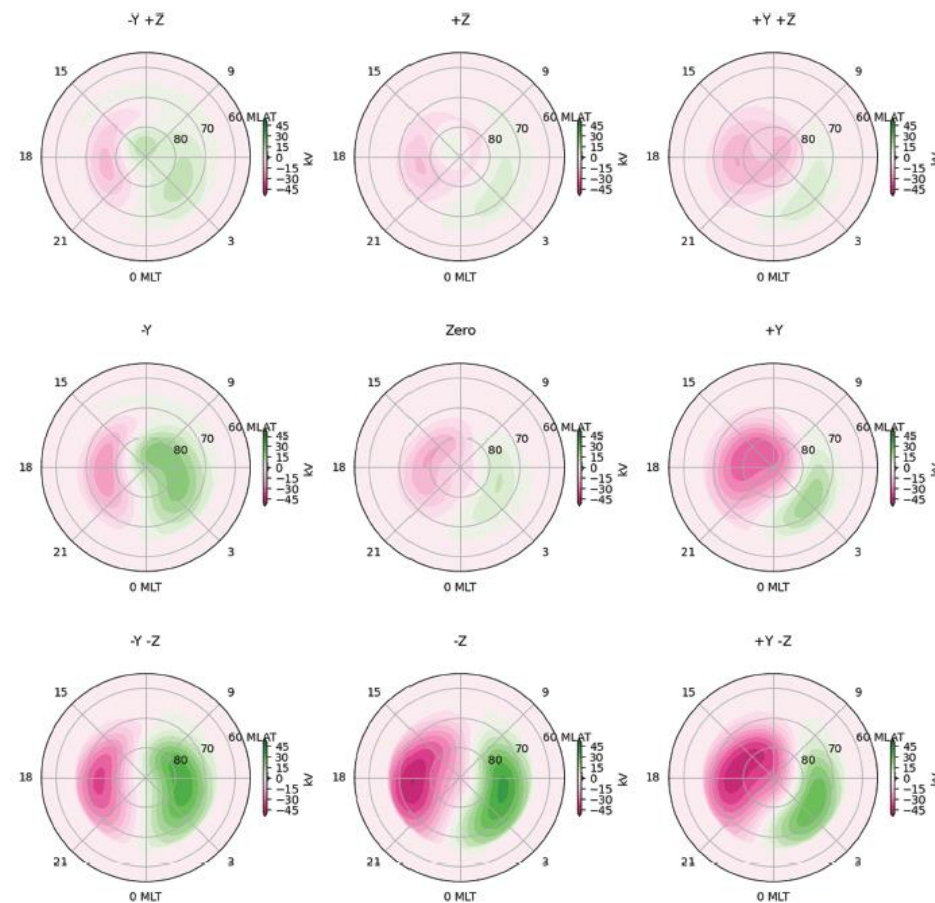
Vsw モデル予測

SMRAI2

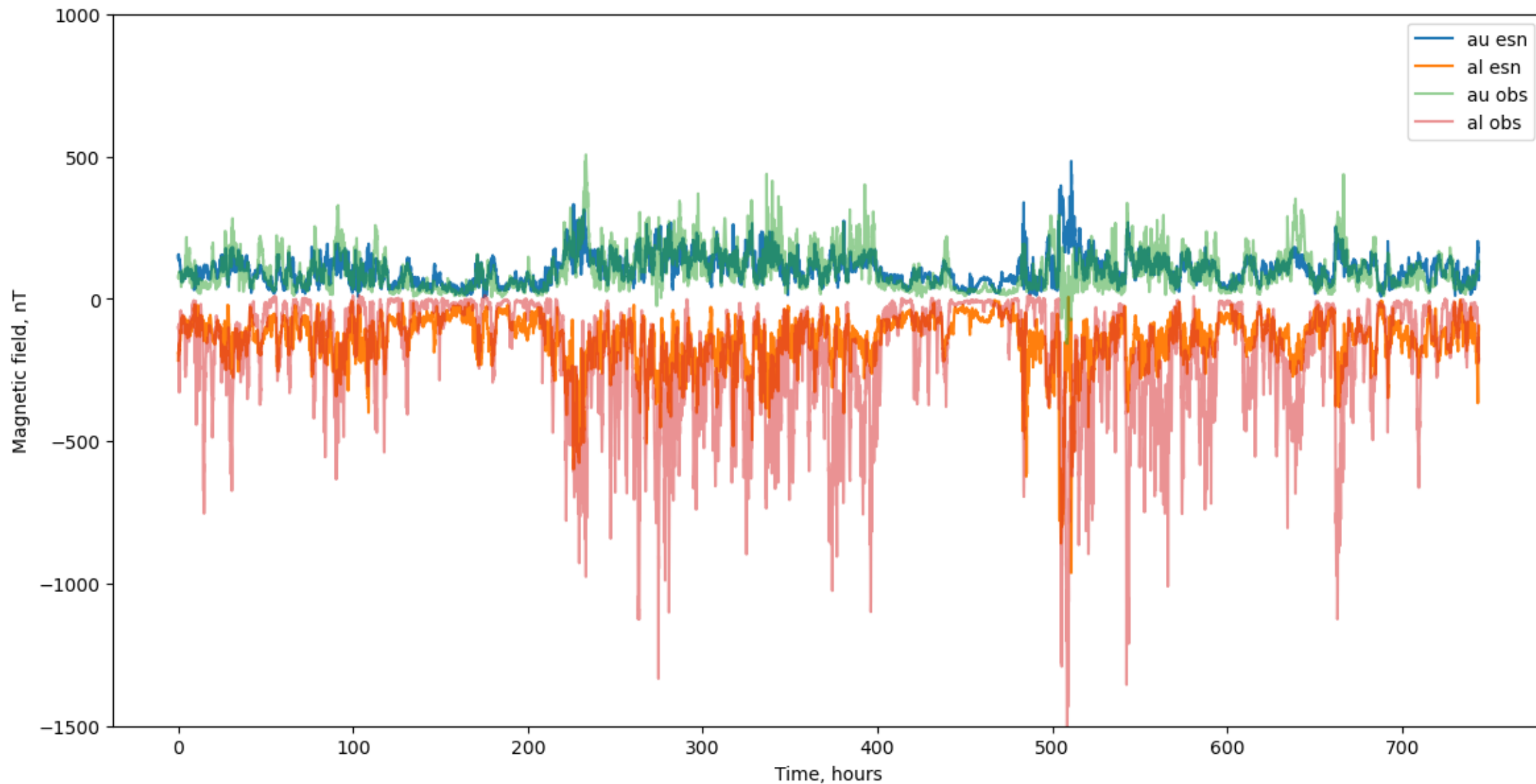
NICTの積年の宇宙天気オペレーション結果を学習させることで、
REPPUシミュレーションにやるオーロラ電流計の計算結果を、
100万倍高速に「エミュレート」できる



SMRAI2



Weimer2k



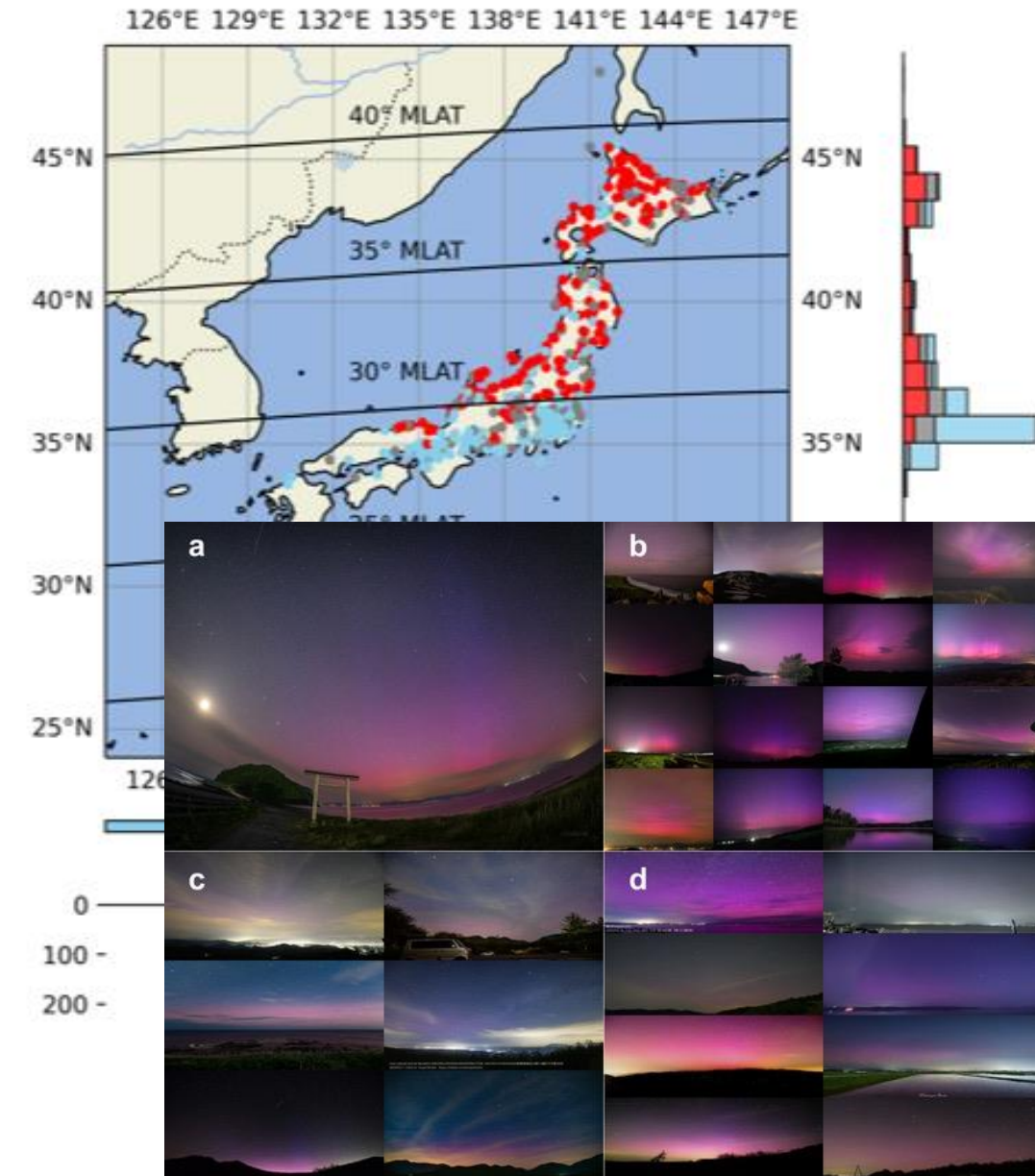
1か月まとめでの計算も、AIエミュレータは一瞬で結果を出す。ただし今は極域に限られる。

巨大磁気嵐の研究は、まだまだ面白い

- 最大規模の磁気嵐の研究が難しいのはデータが限られるところ
 - 「あまりデータがない、というハードル」が高いところが面白い
- 古典籍
 - 日本史の約50例すべての実態解明中（国文研DDH天変地異プロジェクト）
- シミュレーション研究
 - 太陽風モデルは、シースが再現できるようなのをちゃんと研究できないか？
 - 磁気圏モデルは、低ベータ環境をちゃんと研究できないか？
- 機械学習
 - エミュレータのブレンドモデルを検討中（AIエミュレータプロジェクト）
 - ポスドク雇用の予算があります。一緒に研究してくれる方を募集中です。

これからの目標・抱負

- 今後も新しいことに挑戦したい
 - 火星オーロラの研究
 - やはり「あまりデータがない、というハードル」が高い=面白い
 - シチズンサイエンス
 - 「データがありすぎる」という悩み
 - 最近では日本にもオーロラカメラ設置中
- 地球では、いつか私も「マッカ」なオーロラを見て、その感動を、若い人たちに熱く伝えられれば



皆様、ありがとうございました

- 3つの幸運
 - 1. 柿岡百周年で現地見学
 - 2. お隣に国文学研究資料館
 - 3. コロナ禍のパパ友
- 3つの助け
 - 1. 自由な研究を許す職場環境
 - あいつは遊んでいるんじゃないか、のギリギリ。本来「余裕」が大事なはず
 - 2. 支えて頂いた事務のみなさま
 - 3. 一緒に研究してくださった皆様