



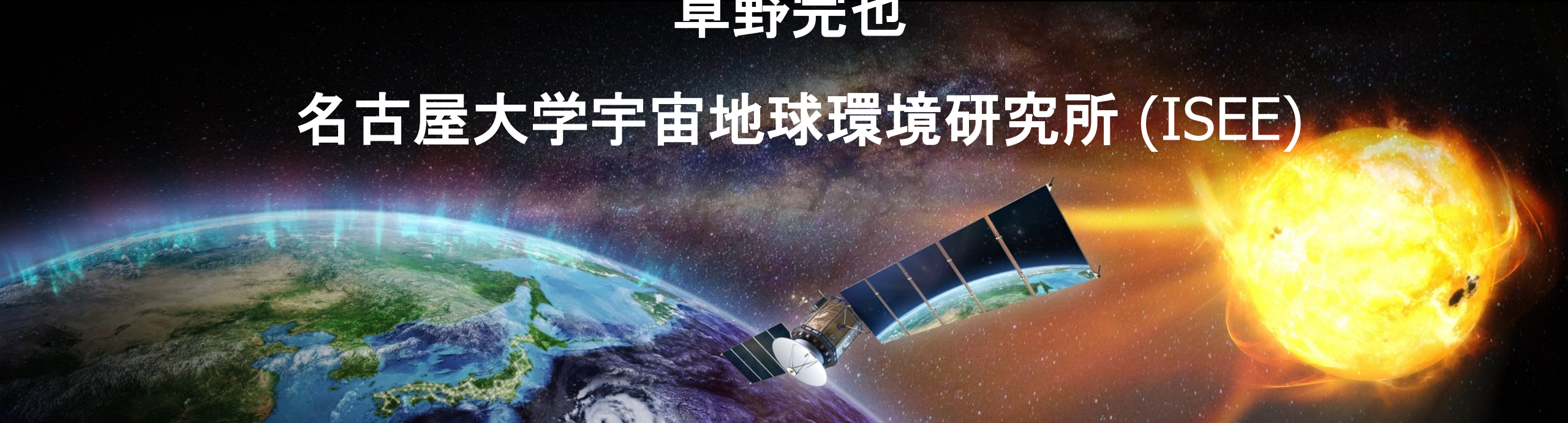
NIFSユニット構築セミナー  
July 7, 2021



# 核融合研究と宇宙地球環境研究 ～分野を超えること繋ぐこと～

草野完也

名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE)

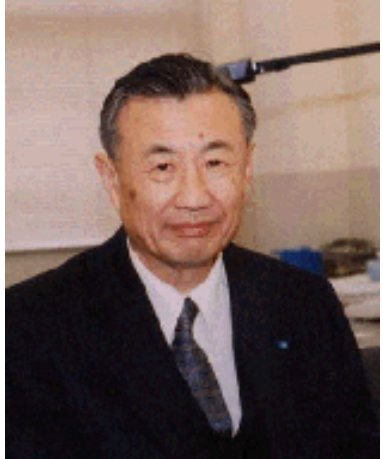


# Outlook

---

- 何を研究課題に選んだか(私の場合)
  - 天文学から、プラズマ核融合・雲・宇宙地球環境科学
- 宇宙地球環境研究と核融合プラズマ研究
  - ① 突発現象の予測
    - 突発現象(太陽フレア、ディスラプション)、宇宙天気予測
  - ② 乱流と構造
    - 乱流・マルチスケール(太陽対流層・ダイナモ、ゾーナルフロー)
  - ③ 波動粒子相互作用
    - 地球放射線帯、オーロラ粒子、太陽高エネルギー粒子
  - ④ 境界領域
    - (地球)電離層、(太陽)彩層、ダイバータプラズマ
  - ⑤ 同位体科学
- 何を研究課題に選ぶか(私のまとめ)

# 自己紹介を兼ねて(私の変遷)



池内 了先生

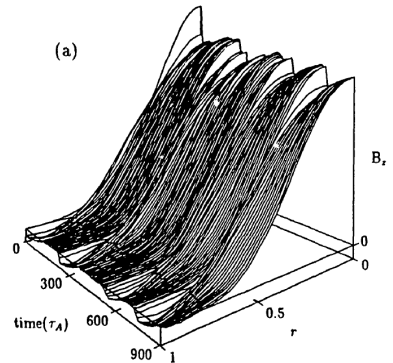
西川恭治先生

佐藤哲也先生

②広島大学 学位取得  
核融合理論研究センター(HIFT)  
「核融合プラズマ」  
「シミュレーション科学」

①北大:理学物理  
「宇宙物理とプラズマ  
物理の基礎」

③JAMSTEC  
地球シミュレータセンター  
「雲」

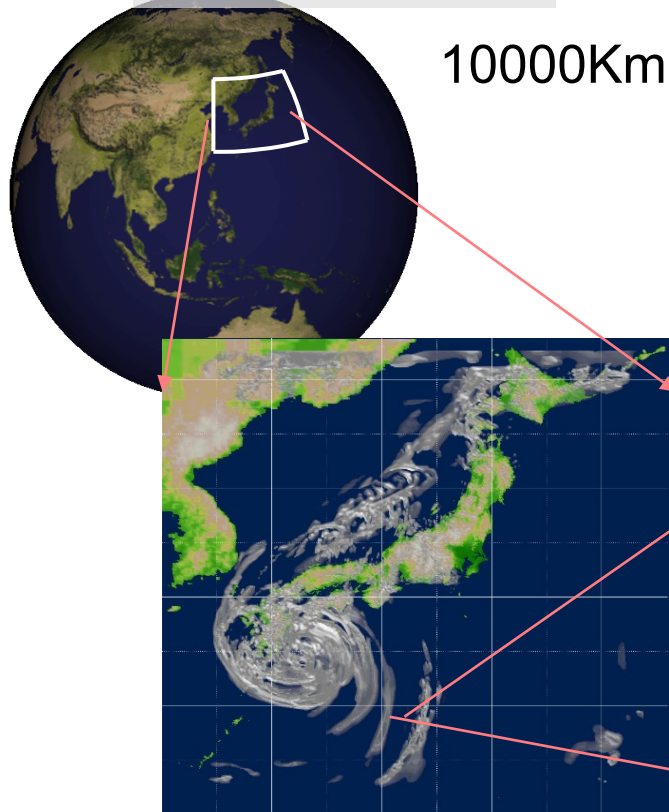


- RFP & ULQの  
自己組織化機構
- 磁気リコネクション
- ダイナモ



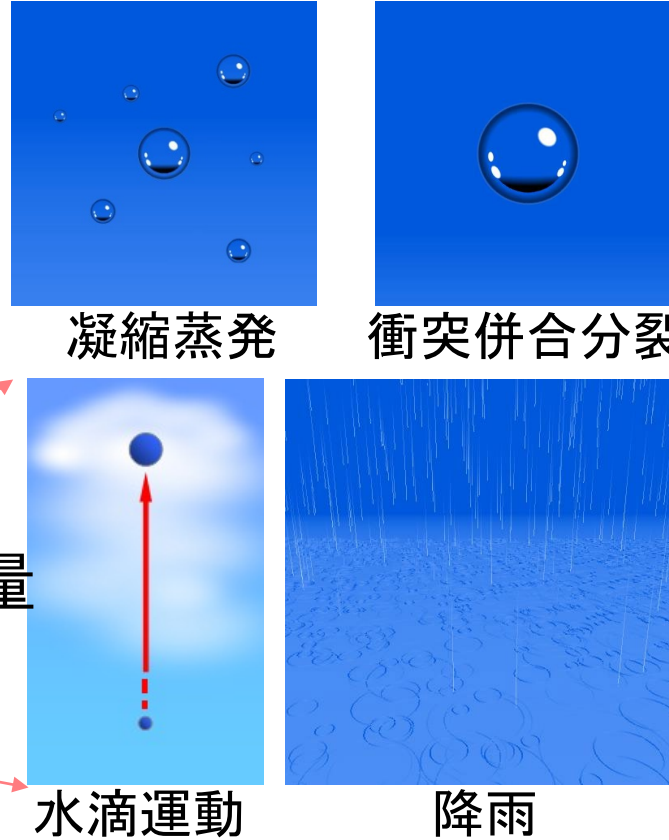
# 雲の物理学 (cloud physics)

## 大気流体力学



10000Km

## 雲微物理 (cloud microphysics)



凝縮蒸発

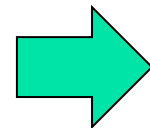
衝突併合分裂

熱  
運動量  
水

水滴運動

降雨

核生成  
(分子動力学)  $10^{-9}\text{m}$



エアロゾル  
 $10^{-6}\text{m}$

海塩(NaCl), 硫酸塩, 有機炭素, 黒色炭素, 硝酸塩, 等  
気相との化学反応、氷晶(雪, ひょう, あられ)への相変化,  
帯電過程等々

雲の水滴半径  
 $1\sim 100\mu\text{m}$

水滴の個数  
 $n\sim 10^2\sim 10^3/\text{cc}$

一個の雲の中には  
 $n(1\text{km})^3\sim 10^{17}\sim 10^{18}$

マルチスケール問題  
多自由度(高次元)問題

従来の雲モデル

\*バルク法 (多流体モデル)

\*ビン法 (粗いブラソフモデル)

# 超水滴モデル(世界初の粒子ベース雲モデル)

## 大気モデル

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\nabla P - (\rho + \rho_w)\bar{g} + \lambda\rho\nabla^2\bar{v},$$

運動量

$$P = \rho R_d T,$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = -\frac{L}{c_p \Pi} S_v + \kappa \nabla^2 \theta,$$

熱

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \bar{v},$$

$$\frac{Dq_v}{Dt} = S_v \cdot$$

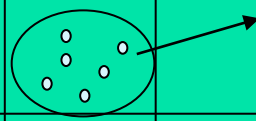
水蒸気

## 超水滴モデル

「同様の属性を持つ十分に混合された複数の水滴の集合を表現する仮想粒子」

particle in cell

実水滴



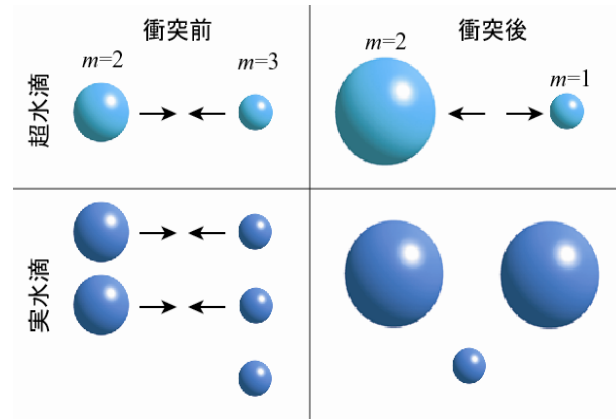
超水滴



位置r、速度v、半径R、凝結核の質量と化学種M、電荷q、多重度n

水滴運動論、衝突併合、凝結成長(エアロゾル効果)

$$S_v = \frac{d}{dt} \rho_w = \frac{d}{dt} \sum_{\text{各セル毎の超水滴の和}} \xi_i m_i$$



衝突併合はモンテカルロ法



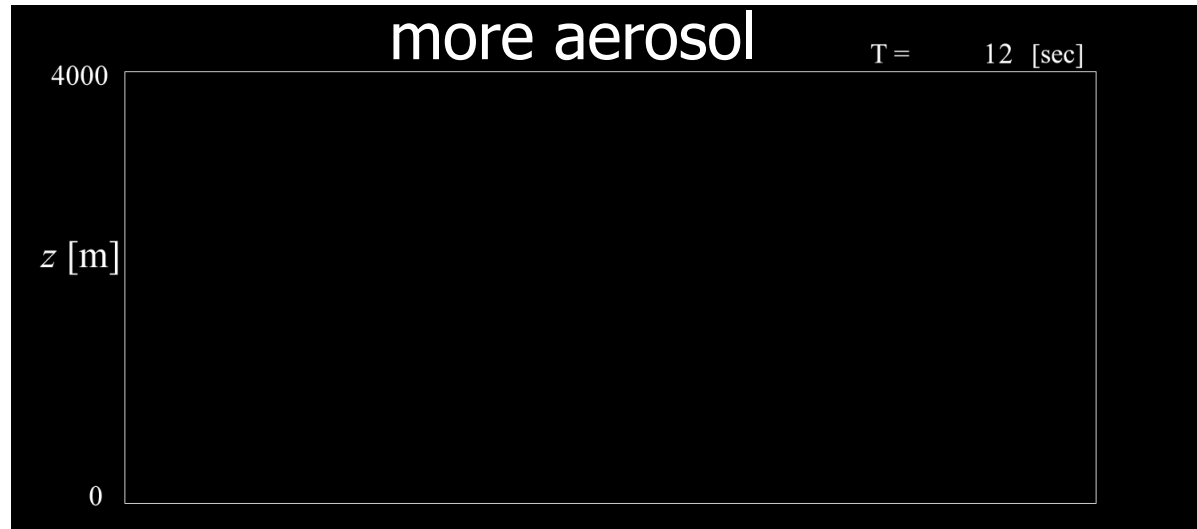
# Cloud Formation Simulated by Super-Droplet Method

T = 12 [sec]



(C) ESC / JAMSTEC

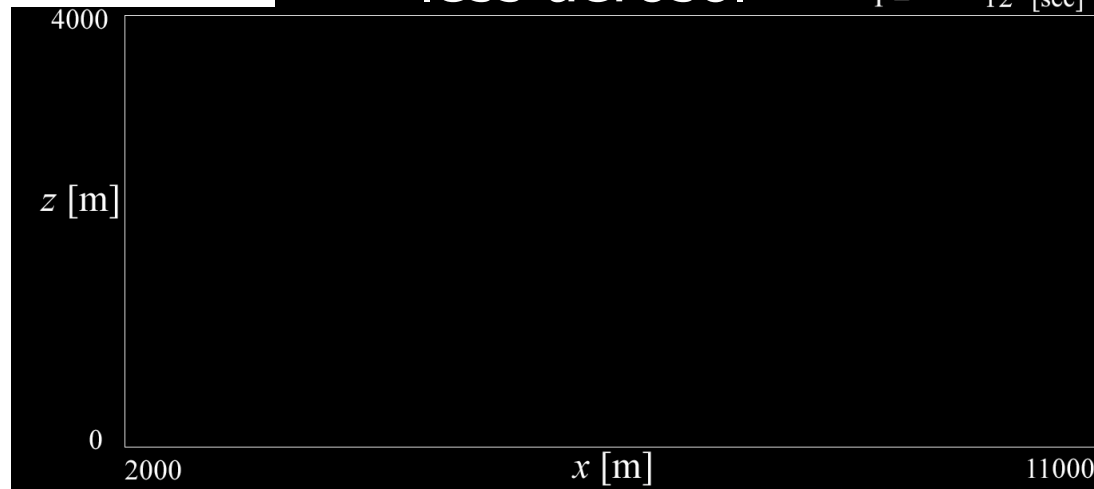
# 積雲生成のエアロゾル数密度依存性



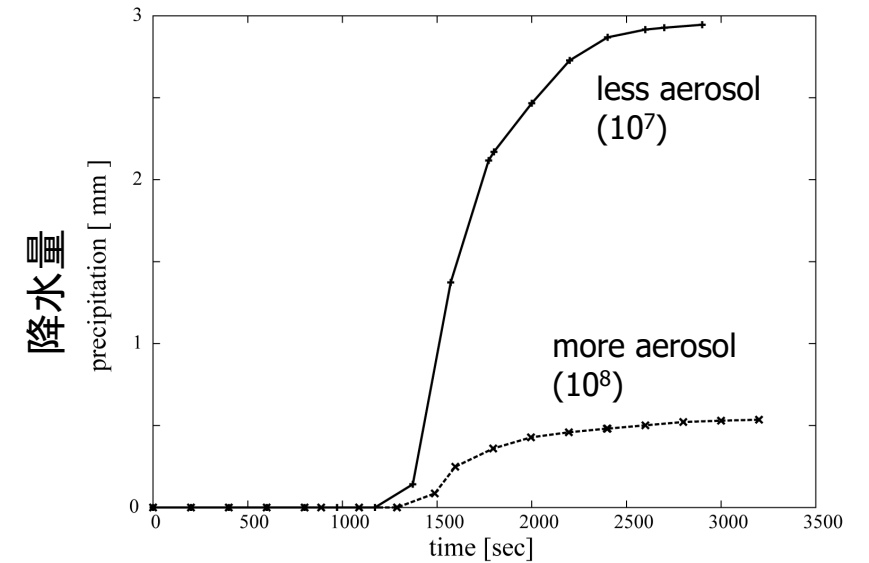
$$N_a = 10^8 m^{-3}$$

less aerosol

T = 12 [sec]

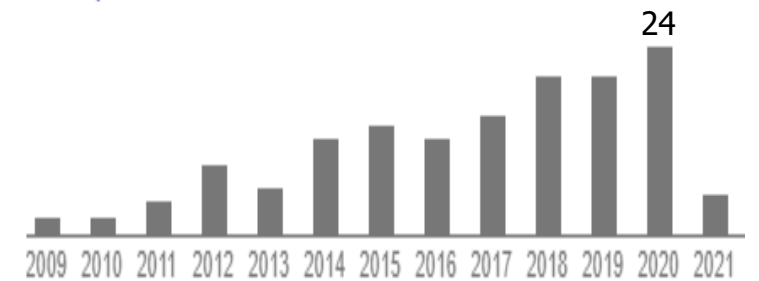


$$N_a = 10^7 m^{-3}$$



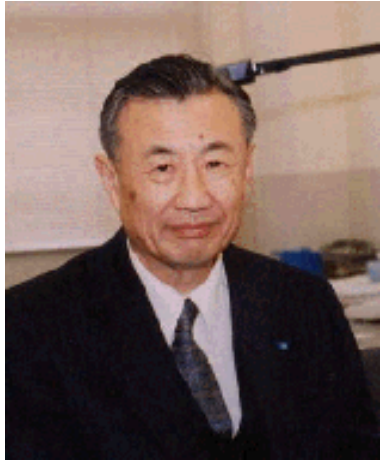
エアロゾル数の違いによる降水量の違い

Cited by 147



Shima, Kusano et al. 2009

# 自己紹介を兼ねて(私の変遷)



池内 了先生

西川恭治先生

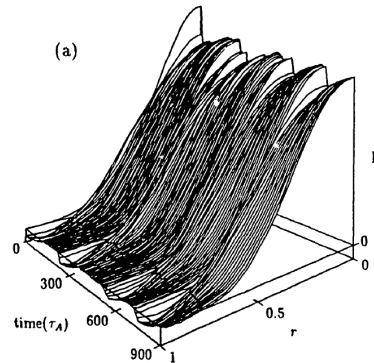
佐藤哲也先生

②広島大学 学位取得  
核融合理論研究センター(HIFT)  
「核融合プラズマ」  
「シミュレーション科学」

①北大:理学物理  
「宇宙物理とプラズマ  
物理の基礎」

③JAMSTEC  
地球シミュレータセンター  
「雲」

④名古屋大学  
宇宙(太陽)地球環境研究所  
「宇宙地球環境の変動予測研究」  
「太陽物理学・宇宙天気」



- RFP & ULQの  
自己組織化機構
- 磁気リコネクション
- 太陽フレアの発現機構
- MHDダイナモ



HOME

研究所について

研究

学生の方へ

共同利用研究者の方へ

公募情報

リンク

アクセス

名古屋大学  
宇宙地球環境研究所

ひとつのシステムとしての地球・太陽・宇宙の理解を通して  
地球環境問題の解決と宇宙にひろがる人類社会の発展に貢献する。



**【ミッション】** 地球・太陽・宇宙を一つのシステムとして捉え、そこに生起する多様な現象のメカニズムと相互作用の解明を通して、地球環境問題の解決と宇宙に広がる人類社会の発展に貢献する。

- ・2015年10月に太陽地球環境研究所、地球水循環研究センター及び年代測定総合研究センターを統合し、発足。
- ・文科省共同利用・共同研究拠点

# 宇宙地球環境研究所における融合研究

宇宙太陽地球システムをシームレスに扱う新たな科学分野の創出に向け、その基軸として4つの融合研究を推進します。同時に、分野融合により理学・工学・環境学にまたがる広い視野を持った国際的な若手研究者を育成します。

太陽活動

- 総合解析研究部  
Integrated Studies
- 気象大気研究部  
Meteorological and Atmospheric Research
- 宇宙線研究部  
Cosmic-Ray Research
- 陸域海洋圏生態研究部  
Land-Ocean Ecosystem Research
- 太陽圏研究部  
Heliospheric Research
- 年代測定研究部  
Chronological Research
- 電磁気圏研究部  
Ionospheric and Magnetospheric Research

附属国際連携研究センター  
Center for International Collaborative Research

- 母子里観測所 Moshiri Observatory
- 陸別観測所 Rikubetsu Observatory
- 富士観測所 Fuji Observatory
- 鹿児島観測所 Kagoshima Observatory

附属統合データサイエンスセンター  
Center for Integrated Data Science

附属飛行体観測推進センター  
Center for Orbital and Suborbital Observations



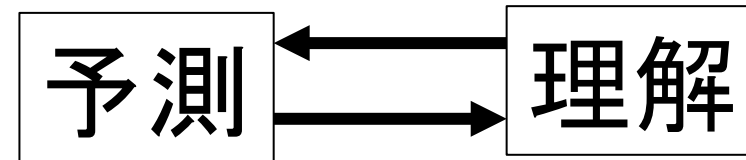
**多様な分野融合を通じた「専門研究の進化」と「新分野の開拓」**

# ①突発現象の予測

## ■ 様々な突発現象

- 太陽フレア
- トカマク・ディスラプション
- LH遷移
- 雪崩、土砂崩れ
- 地震
- 台風の急速成長
- 超新星爆発、GRB
- 大恐慌
- 戦争

「予測」と「理解」のフィードバック

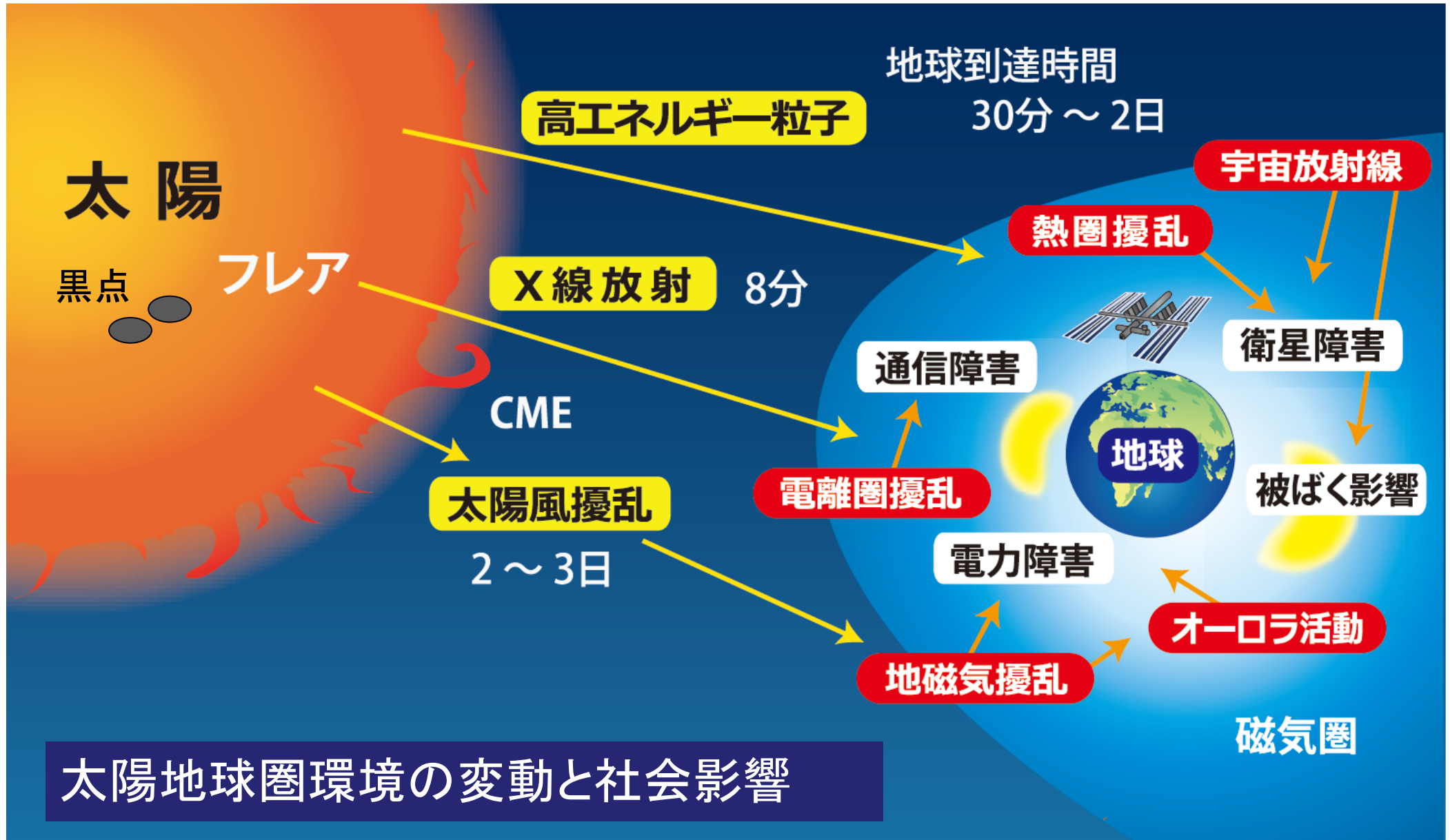


失敗した予測こそ新しい科学  
(理解)への扉  
(天王星の軌道予測のずれから海王星の発見)

核融合と宇宙プラズマの予測研究から  
幅広い予測科学(predictive science)を目指す



# 宇宙天気(宇宙環境変動)とその社会影響



# 太陽地球圏環境予測 (PSTEP)

## 我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成

### 領域代表挨拶



草野 完也 Kusano Kanya

名古屋大学 宇宙地球圏環境研究所  
副所長・教授

人類が宇宙へ進出してから半世紀以上が経過し、今やその探索領域は太陽系全体に広がりました。また、情報化社会が急速に進化し、我々の生活は様々なかたちで高度な情報システムと宇宙技術に強く結びついています。その結果、太陽と宇宙空間の変動が地球の環境や人間社会にも多様な影響を与えることが分かってきました。

1859年に英国の天文学者キヤリントンが発見した強力な太陽面爆発(キヤリントンフレア)と、それに起因した巨大磁気嵐(キヤリントンイベント)に匹敵する大規模な太陽地球圏環境変動が、もし現代社会を襲った場合、電力、衛星、航空、通信ネットワークなどは前例の無い致命的な打撃を全地球的に受けると考えられています。さらに、最新の恒星観測や樹木年輪の解析によって、これを大きく上回る現象が起きる可能性も指摘されています。しかし、太陽面爆発の発生機構とその影響に関する詳細なメカニズムは未だ十分に解明されていません。そのため、現代社会は、将来起き得る巨大な太陽面爆発に起因した激しい宇宙環境変動に対して潜在的なリスクを抱えています。

また、太陽地球圏環境変動の原因となる太陽黒点活動は約11年の周期で活発化しますが、現在の太陽周期(サイクル24)は、過去100年間で最も黒点数が少ない特異な周期となりつつあります。太陽活動が地球の気象、気候に影響を与えることを示唆する多くのデータがありますが、その原因は未だに解明されていません。そのため、気候変動予測における太陽活動の評価には依然として大きな不確定性が残っています。

以上の背景より、我々が生きる太陽地球圏環境を正確に理解すると同時にその変動を正しく予測することは、科学的にも社会的にも重要な緊急性の高い課題であることが分かります。新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成」はそうした認識の上に、様々な研究者の危機感と強い意志に基づいて企画提案された研究プロジェクトです。本領域では、我が国が世界に誇る最新の観測システムと先進的な物理モデルの融合によって太陽地球圏環境の変動を探索分野横断研究を展開し、科学研究と予測研究の相乗的な発展を推進すると共に、宇宙天気予報を社会基盤にまで高めることを目的としています。

本領域研究では国内外の関連研究者との幅広い協力のもと、太陽地球圏環境の予測を通じた新たな学術を発展させることにより、真に科学と社会に貢献できる優れた成果を生み出したいと考えています。多くの皆様からのご支援をいただき、研究を進めたいと考えています。

### 太陽地球圏環境の理解と予測を目指して

#### 研究目的

本領域は、太陽観測衛星「ひので」やジオスペース探査衛星「ERG」など我が国が世界に誇る最新の観測システムと先進的な物理モデルの融合によって太陽地球圏環境の変動を探索分野横断研究を展開することで、以下の目的を達成します。

- 目的1: 科学的な重要課題の抜本的解決**  
太陽フレアの発生とそれに伴う地球電磁気圏擾乱のメカニズム、太陽同期活動の変動とその気象気候影響など、これまで長年解明することができなかった科学的な重要課題の多くを抜本的に解決する。
- 目的2: 社会基盤としての宇宙天気予報の飛躍的な発展**  
密接な分野横断研究を通して太陽地球圏環境変動が社会システムに与える影響を具体的に予測すると同時に、その結果を定量的に評価する双方向システムを構築することによって、社会基盤としての宇宙天気予報を飛躍的に発展させる。
- 目的3: 宇宙天気ハザードマップの作成**  
現代文明がこれまで経験したことのない激甚宇宙天気災害の精密なシミュレーションを行うことにより、宇宙天気ハザードマップを作成し、現代社会の基礎整備に貢献する。

#### 研究戦略

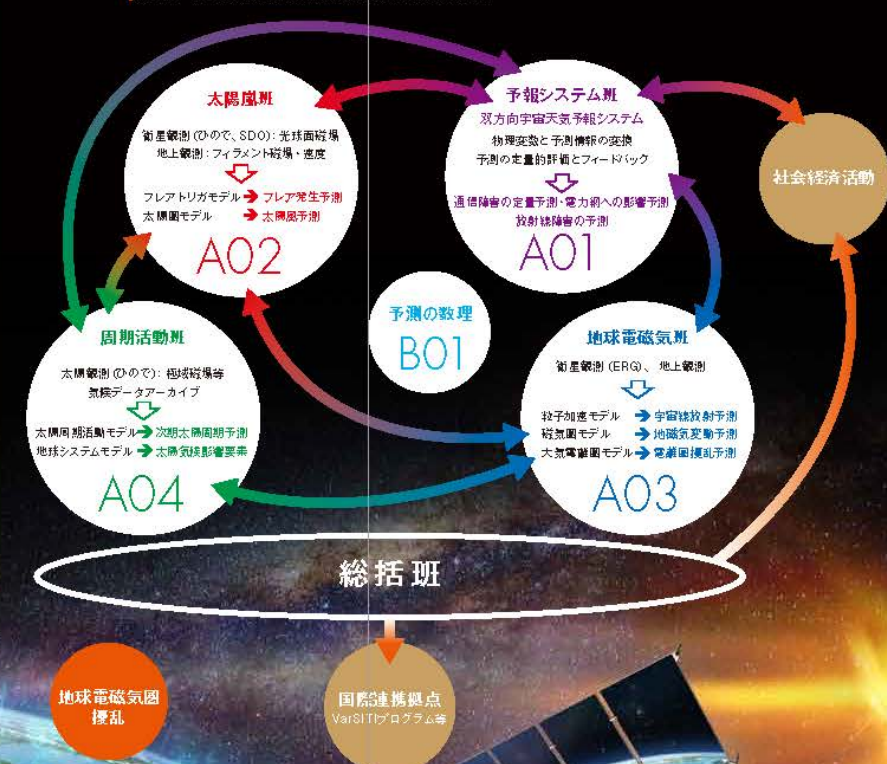
**A01: 予報システム班**  
本領域研究で見出される最新の知見をもとに、実社会で宇宙天気情報が必要とする事業者と協力し、宇宙天気関連災害から社会インフラを守るための体制を構築することを目的とします。このため、社会における宇宙天気情報のニーズに応える予報を実現すると共に、宇宙天気予報を基礎科学研究に活かすためのフィードバックシステムを構築します。

**A02: 太陽風班**  
太陽フレアやコロナ質量放出(CME)等の太陽面爆発に伴って、宇宙空間における紫外線やX線、高エネルギー粒子(放射線)、磁化プラズマの嵐などが激しく変動する太陽嵐が発生します。本研究班では観測データと物理モデルの融合を通じて、歴史的な科学課題である太陽フレアの発生機構を解明すると共に、太陽嵐とその影響の予測精度を抜本的に改善します。

**A03: 地球電磁気班**  
地球電磁気圏で生じる宇宙天気現象のうち、①宇宙放射線(地球放射線帯電子、太陽プロトン)、②電離圏の電子密度変動、③磁気嵐時に地表の送電線に誘導される電流に焦点をあて、これらの3つの現象が太陽や太陽風の擾乱にどのように応答し、どのような変動を示すかについての予測を行う。このためのモデル開発を行うとともに、観測との比較を通じて、予測の精度向上を進めます。

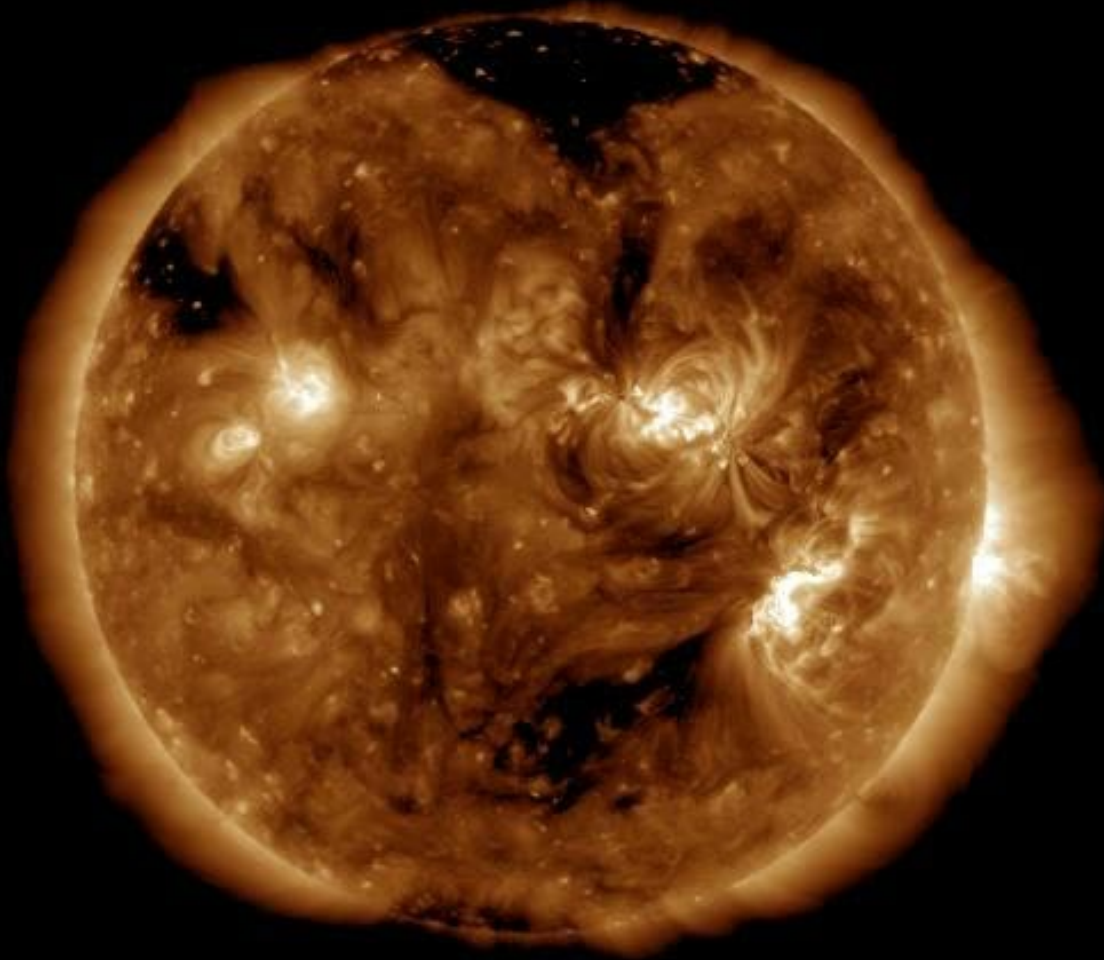
**A04: 同期活動班**  
先進的な太陽観測と太陽ダイナモモデルを結び付けて次期太陽同期の活動予測に挑戦します。また、最新の観測と情報地理技術を用いてマウンダー極小期のような極端な低活動状態が発生する可能性を吟味します。さらに、全太陽放射強度・スペクトルの長期変動や銀河宇宙線変動などの外部強制変動に対する大気応答過程を気象研究所地球システムモデルに組み込み、太陽活動変動が気象・気候に影響を与える主物理メカニズムを特定します。

**B01: 予測のための数理科学研究**  
太陽地球圏環境予測を目指した先進的な数理解析研究、数値計算アルゴリズム開発、大規模シミュレーション、機械学習システム開発、同化手法開発、ビッグデータ分析など様々な数理科学研究を公費研究として推進します。



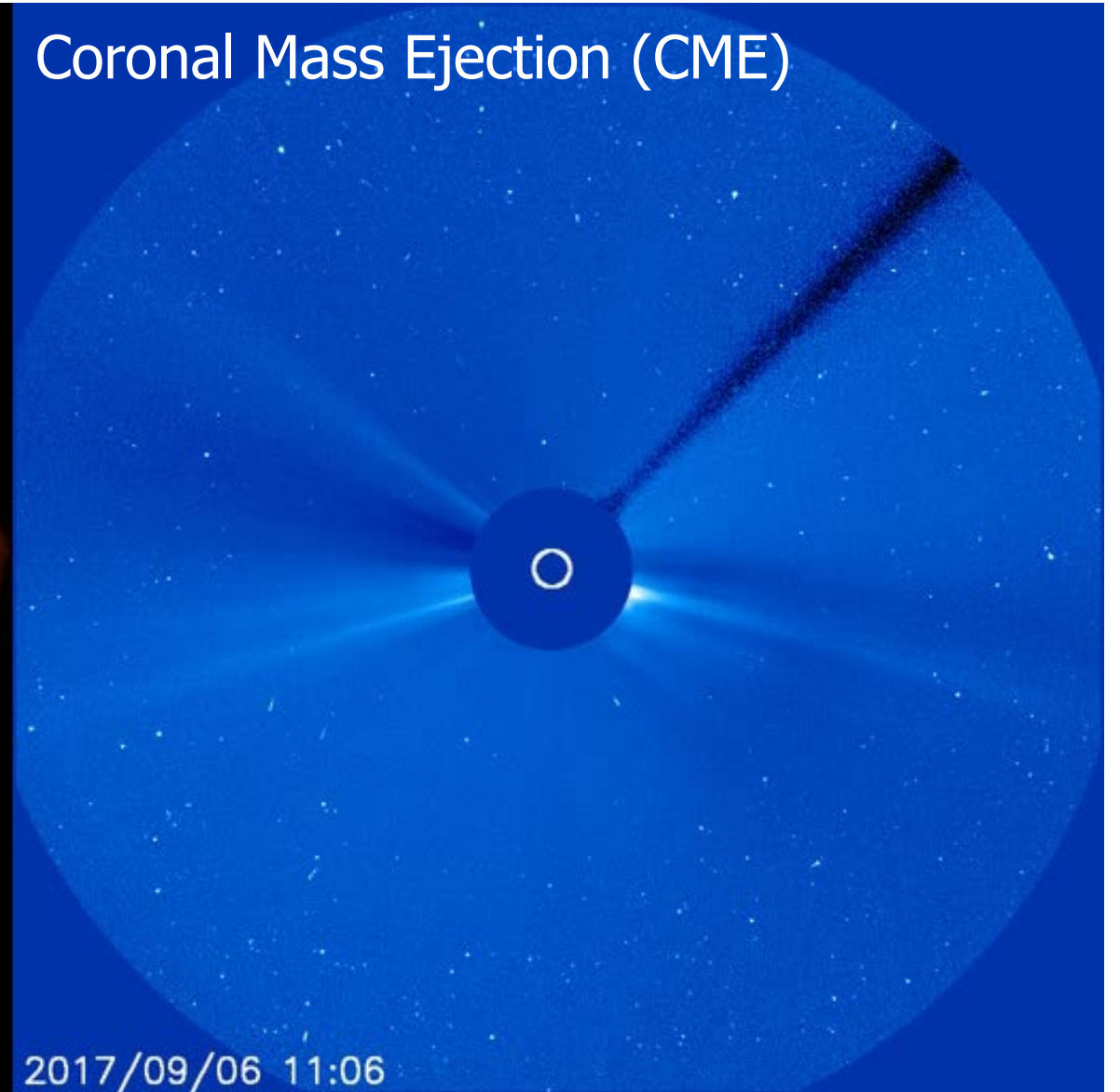
# The largest flare in the solar cycle 24

Solar flare



SDO/AIA 193: 2017/09/06 11:00:17

Coronal Mass Ejection (CME)



2017/09/06 11:06

# 従来のフレア予測(経験的予測)

フレア発生機構は十分に解明できていないため、これまでのフレア予測は黒点や強磁場領域の大きさや形状と太陽フレアの経験的な関係に基づいて行われていた。

太陽黒点のMcIntosh分類

McIntosh Sunspot Group Classification		
Modified Zürich Class	Penumbra of largest spot	Sunspot distribution
A	x	x
B	r	o
C	s	
D	a	c
E	h	
F	k	penumbra umbra
H		Length

McIntosh 1990

活動領域のMount Wilson分類

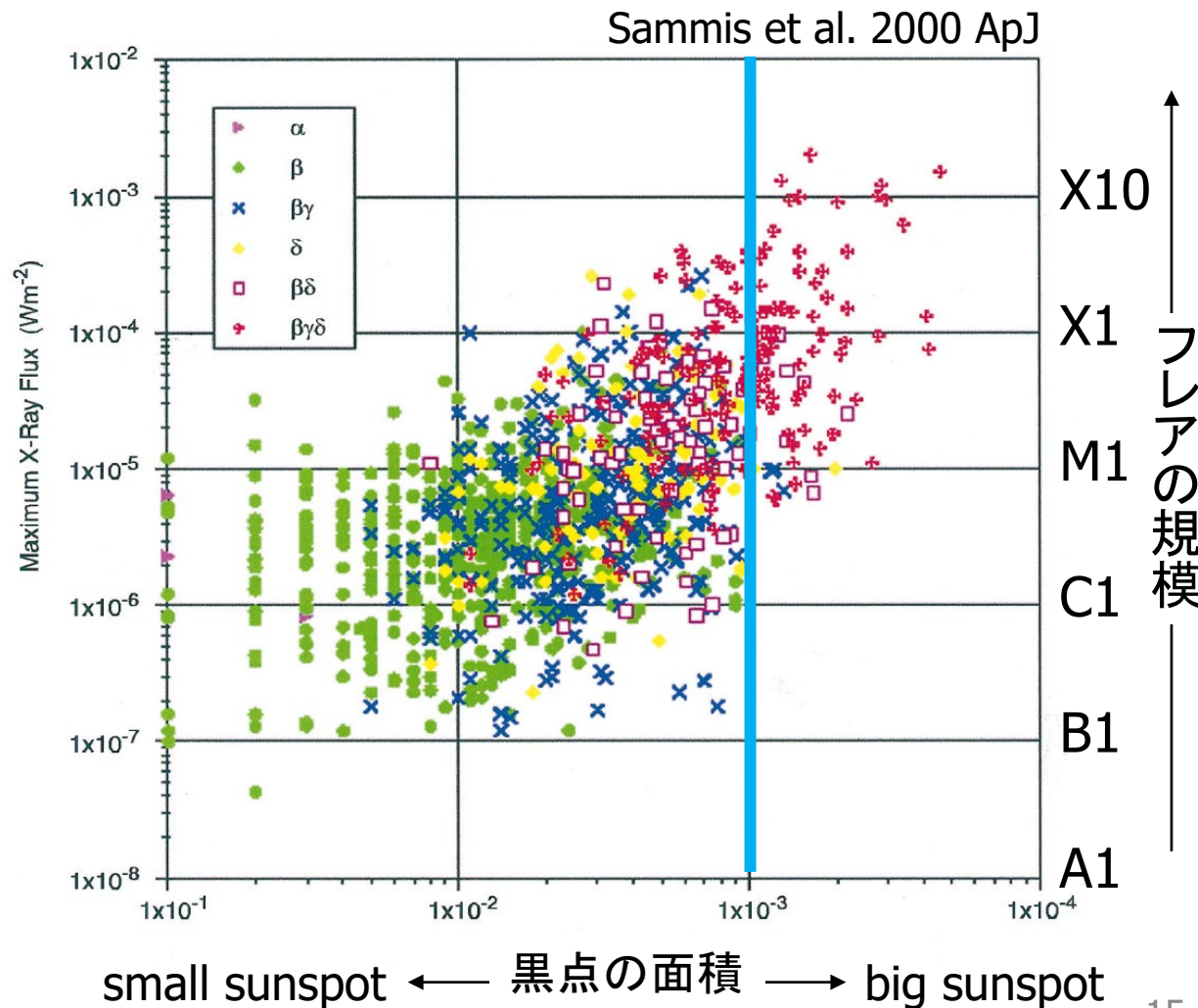
	$\alpha$
	$\beta$
	$\beta\gamma$
	$\gamma$
	$\gamma\delta$

Nikbakhsh+ 2019

	観測発生	観測非発生
予測発生	50	67
予測非発生	52	31315

予測率: 49% (~50/102)  
擬陽性率: 57% (~67/117)

黒点面積及び活動領域のMount Wilson分類とフレア規模の統計的關係



米国NOAAの第23太陽周期におけるXクラスフレア予測結果

# 機械学習による予測パラメタの探査 (Bobra & Couvidat, 2015)

Support Vector Machine  
(Cortes & Vapnik 1995)による  
フレア領域と非フレア領域の磁  
場パラメタ分離

SDO HMI Magnetogram 23-Mar-2021 18:58:36.300

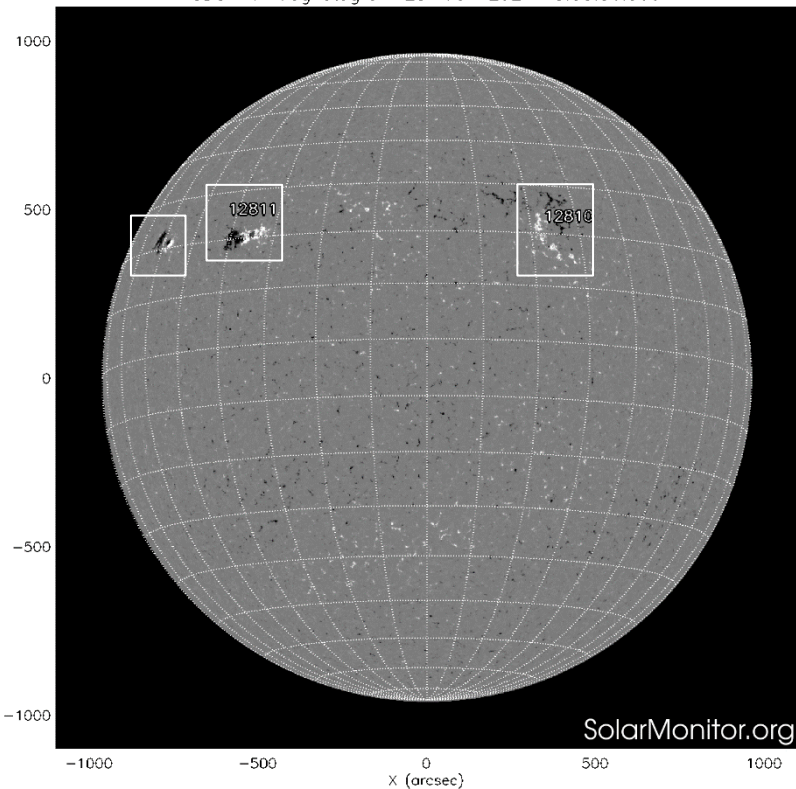


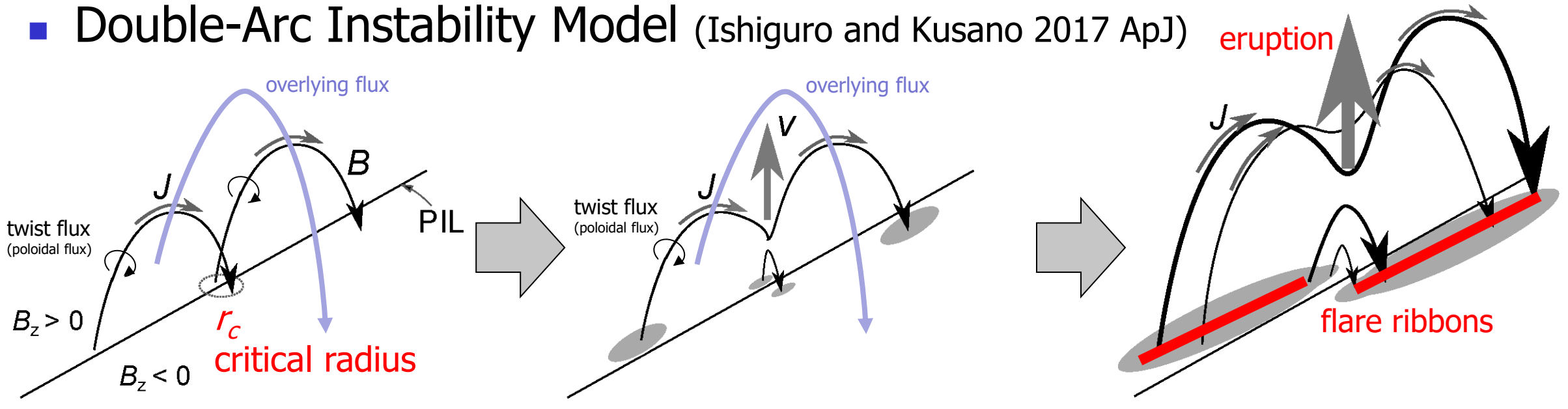
Table 1  
SHARP Active Region Parameter Formulae

Keyword	Description	Formula	F-Score	Selection
TOTUSJH	Total unsigned current helicity	$H_{c\text{total}} \propto \sum  B_z \cdot J_z $	3560	Included
TOTBSQ	Total magnitude of Lorentz force	$F \propto \sum B^2$	3051	Included
TOTPOT	Total photospheric magnetic free energy density	$\rho_{\text{tot}} \propto \sum (B^{\text{Obs}} - B^{\text{Pot}})^2 dA$	2996	Included
TOTUSJZ	Total unsigned vertical current	$J_{z\text{total}} = \sum  J_z  dA$	2733	Included
ABSJNZH	Absolute value of the net current helicity	$H_{c\text{abs}} \propto  \sum B_z \cdot J_z $	2618	Included
SAVNCPP	Sum of the modulus of the net current per polarity	$J_{z\text{sum}} \propto \left  \sum J_z dA \right  + \left  \sum J_z dA \right $	2448	Included
USFLUX	Total unsigned flux	$\Phi = \sum  B_z  dA$	2437	Included
AREA_ACR	Area of strong field pixels in the active region	Area = $\sum$ Pixels	2047	Included
TOTFZ	Sum of z-component of Lorentz force	$F_z \propto \sum (B_x^2 + B_y^2 - B_z^2) dA$	1371	Included
MEANPOT	Mean photospheric magnetic free energy	$\bar{\rho} \propto \frac{1}{N} \sum (B^{\text{Obs}} - B^{\text{Pot}})^2$	1064	Included
R_VALUE	Sum of flux near polarity inversion line	$\Phi = \sum  B_{\text{LoS}}  dA$ within R mask	1057	Included
EPSZ	Sum of z-component of normalized Lorentz force	$\delta F_z \propto \frac{\sum (B_x^2 + B_y^2 - B_z^2)}{\sum B^2}$	864.1	Included
SHRGT45	Fraction of Area with shear > 45°	Area with shear > 45° / total area	740.8	Included
MEANSHR	Mean shear angle	$\bar{\Gamma} = \frac{1}{N} \sum \arccos \left( \frac{B^{\text{Obs}} \cdot B^{\text{Pot}}}{ B^{\text{Obs}}   B^{\text{Pot}} } \right)$	727.9	Discarded
MEANGAM	Mean angle of field from radial	$\bar{\gamma} = \frac{1}{N} \sum \arctan \left( \frac{B_h}{B_z} \right)$	573.3	Discarded
MEANGBT	Mean gradient of total field	$ \nabla B_{\text{tot}}  = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left( \frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B}{\partial y} \right)^2}$	192.3	Discarded
MEANGBZ	Mean gradient of vertical field	$ \nabla B_z  = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left( \frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2}$	88.40	Discarded
MEANGBH	Mean gradient of horizontal field	$ \nabla B_h  = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left( \frac{\partial B_h}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_h}{\partial y} \right)^2}$	79.40	Discarded
MEANJZH	Mean current helicity ( $B_z$ contribution)	$\bar{H}_c \propto \frac{1}{N} \sum B_z \cdot J_z$	46.73	Discarded
TOTFY	Sum of y-component of Lorentz force	$F_y \propto \sum B_y B_z dA$	28.92	Discarded
MEANJZD	Mean vertical current density	$\bar{J}_z \propto \frac{1}{N} \sum \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right)$	17.44	Discarded
MEANALP	Mean characteristic twist parameter, $\alpha$	$\alpha_{\text{total}} \propto \frac{\sum J_z \cdot B_z}{\sum B_z^2}$	10.41	Discarded
TOTFX	Sum of x-component of Lorentz force	$F_x \propto -\sum B_x B_z dA$	6.147	Discarded
EPSY	Sum of y-component of normalized Lorentz force	$\delta F_y \propto \frac{-\sum B_y B_z}{\sum B^2}$	0.647	Discarded
EPSX	Sum of x-component of normalized Lorentz force	$\delta F_x \propto \frac{\sum B_x B_z}{\sum B^2}$	0.366	Discarded



# フレア発生の物理モデル(駆動型不安定性)

## ■ Double-Arc Instability Model (Ishiguro and Kusano 2017 ApJ)



Trigger-reconnection  
(tether-cutting reconnection)  
Moore+(2001)

**Double-Arc Instability**  
(triggered by the small reconnection)

Onset of Flare

The critical condition of D/A instability

$$\kappa = \frac{\int_{r_c} T_w d\phi}{\Phi_{over}} > 0.1$$

Labels in the diagram:  
 - magnetic twist (pointing to  $T_w$ )  
 - twist flux (pointing to  $d\phi$ )  
 - overlying magnetic flux (pointing to  $\Phi_{over}$ )

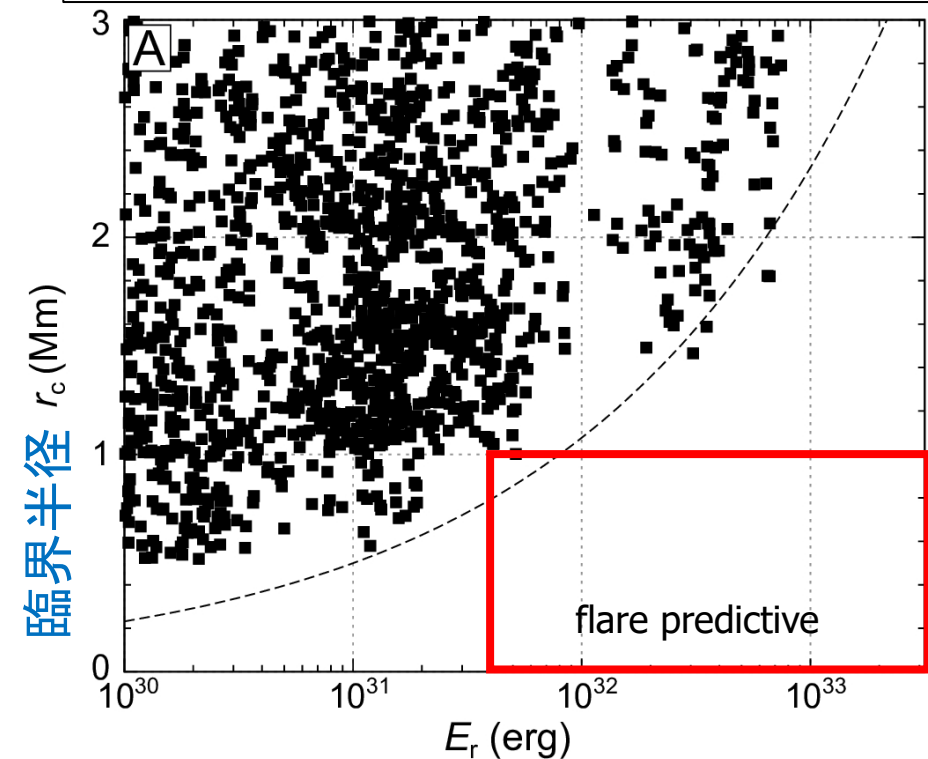
magnetic twist

$$T_w = \frac{\text{poloidal flux}}{\text{toroidal flux}}$$

# $\kappa$ -schemeによる予測の統計的検証

## Group 1: Non-flaring regions

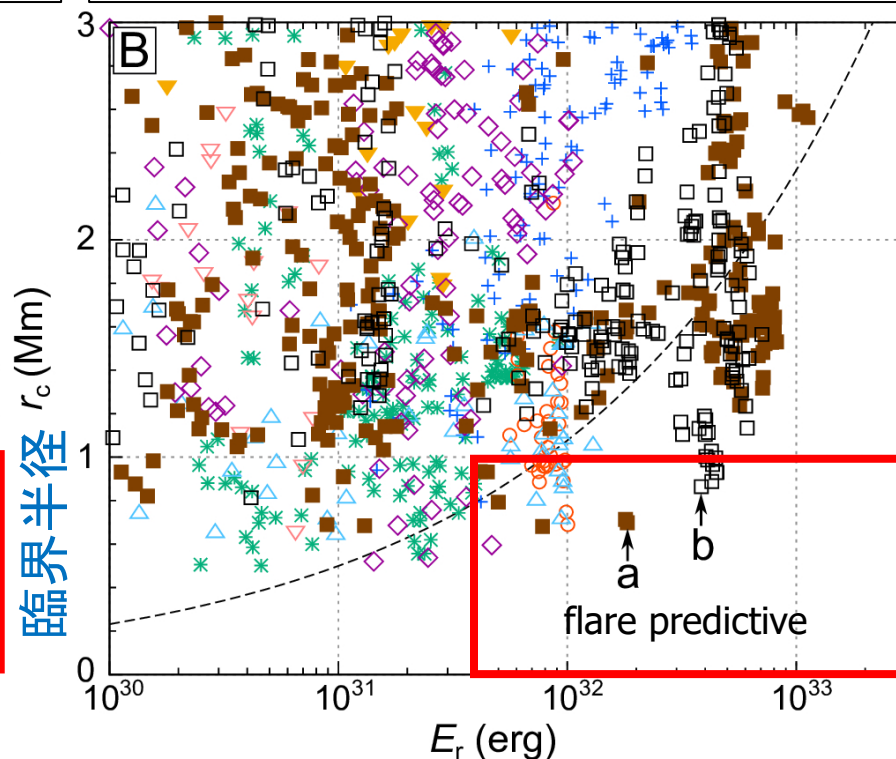
- 198 largest sunspot regions in solar cycle 24
- No large flare  $> X2$  occurred for 20 h after the observation
- Data when the region was on the central meridian.



解放可能エネルギー

## Group 2: Flaring regions

- The seven active regions that produced all flares of class X2 or larger within solar latitudes  $\pm 50^\circ$  during solar cycle 24.



AR 11158 X2.2 *	AR 11890 X3.3 $\triangle$	AR 12297 X2.1 $\diamond$
AR 11283 X2.1 $\circ$	AR 12192 X3.1 $\nabla$	AR 12673 X2.2 $\blacksquare$
AR 11429 X5.4 +	AR 12192 X2.0 $\blacktriangledown$	AR 12673 X9.3 $\square$

exceptional



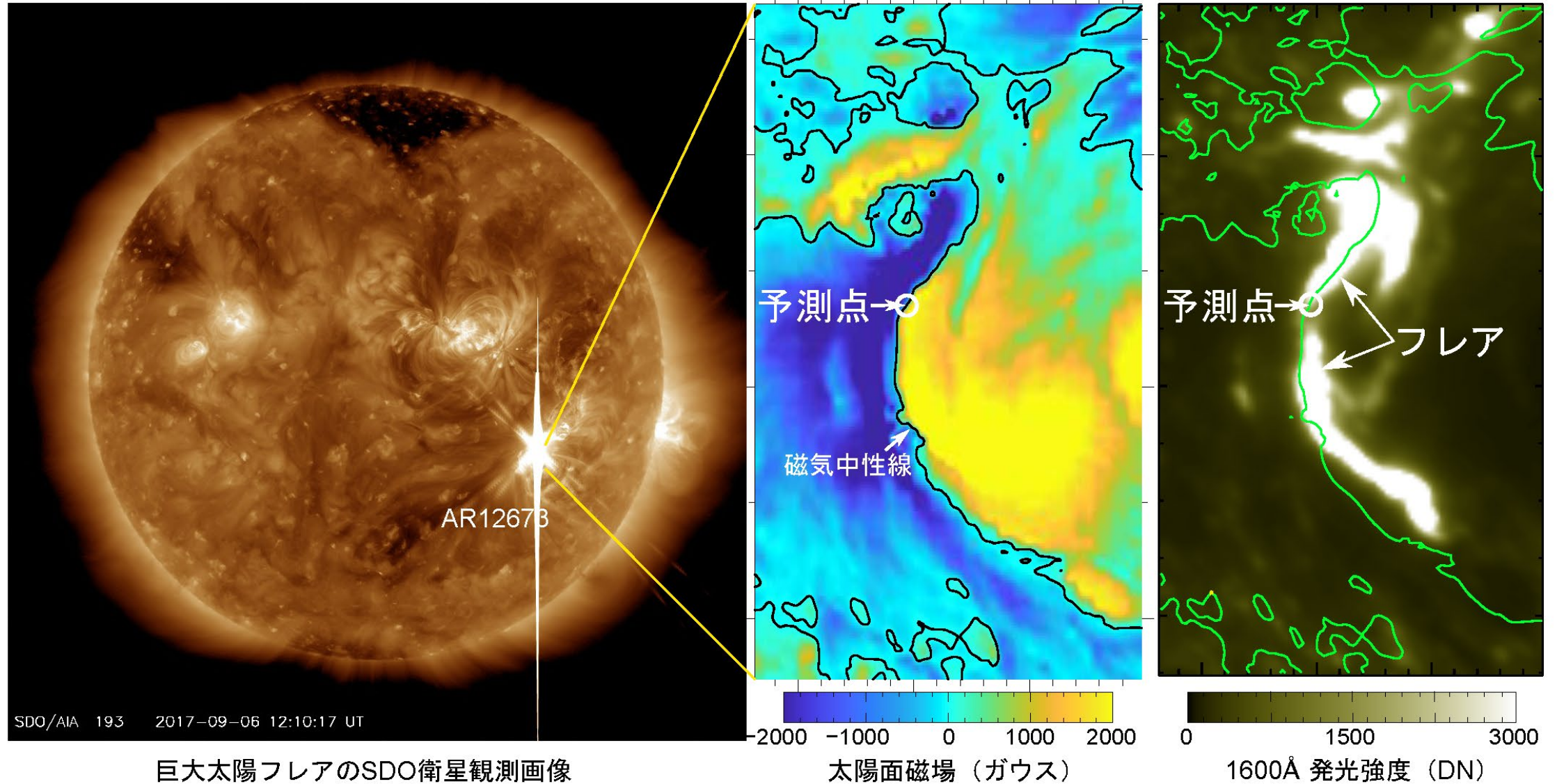
Kusano et al. 2020, Science  
DOI: 10.1126/science.aaz2511

Six out of the seven flaring regions (the only exception being AR 12192) satisfied the condition

$r_c < 1 \text{ Mm}$  and  $E_r > 4 \times 10^{31} \text{ erg}$   
before their flares.

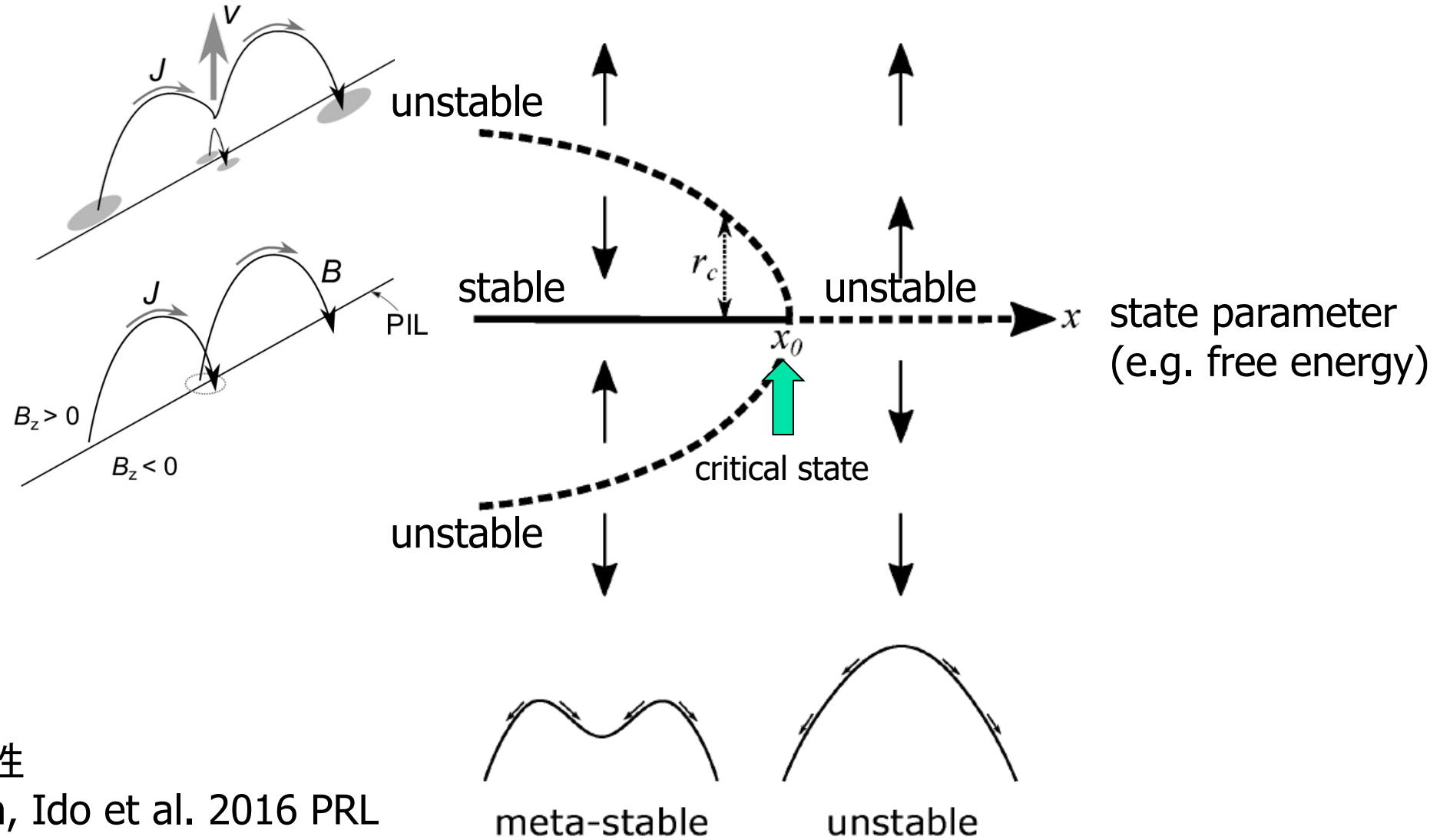
予測率  $\sim 80\%$   
擬陽性率  $\sim$  数%

# フレア発生 の 精密位置を予測



巨大太陽フレアのSDO衛星観測画像

# Sub-critical Bifurcation



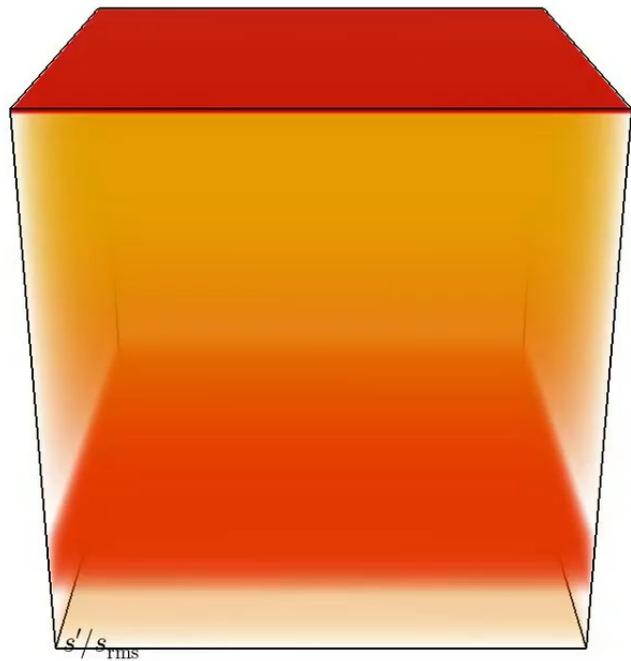
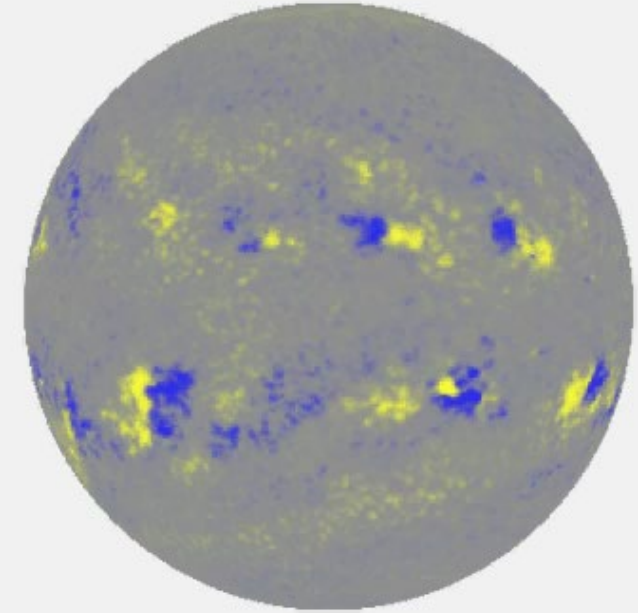
亜臨界不安定性

c.f., Lasur, Itoh, Ido et al. 2016 PRL  
(EGAM burst)

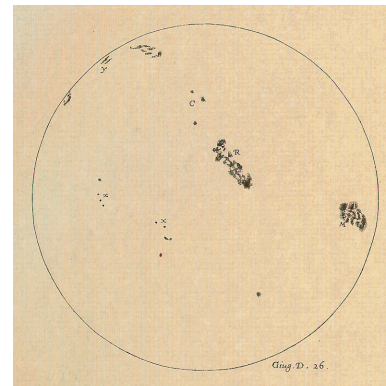
## ②乱流と構造

- 太陽周期(400年間の謎)
  - 黒点数は約11年周期で増減(シュワーベ周期)
  - 磁気極性は毎周期反転(ヘール周期)
- 複雑な小スケール乱流対流から何故、大スケール磁場が秩序をもって形成されるか？

### 太陽面磁場の変化

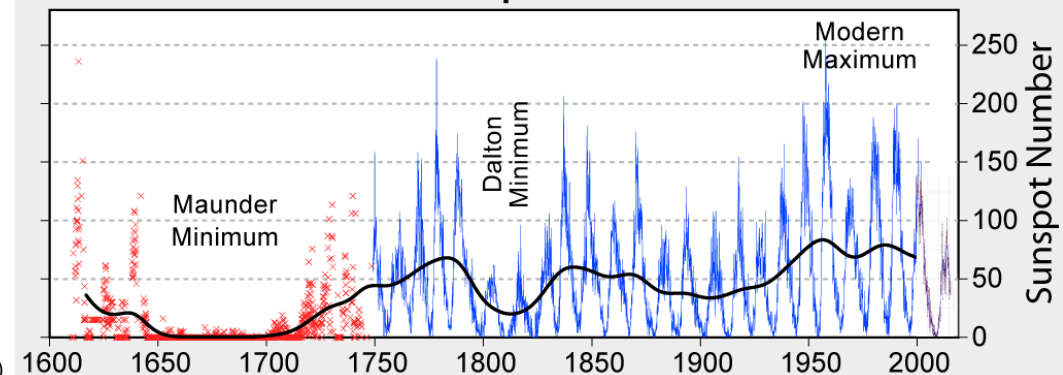


Hotta, Iijima, & Kusano  
2019 Sci. Adv.



ガリレオの黒点スケッチ(1613年)

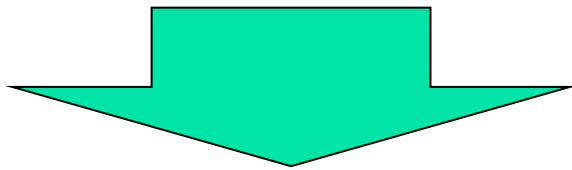
### 400 Years of Sunspot Observations



t=0.00 [day]

# ダイナモモデル

- **赤道加速**による $\Omega$ 効果  
(磁力線の引き延ばし)
- 磁気浮力による黒点形成と  
コリオリカによる磁束の捻じれ
- **子午面循環**による磁束輸送

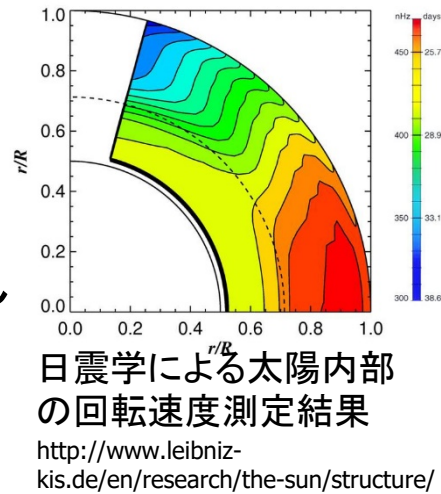


「富岳」による超精密計算にて再現成功

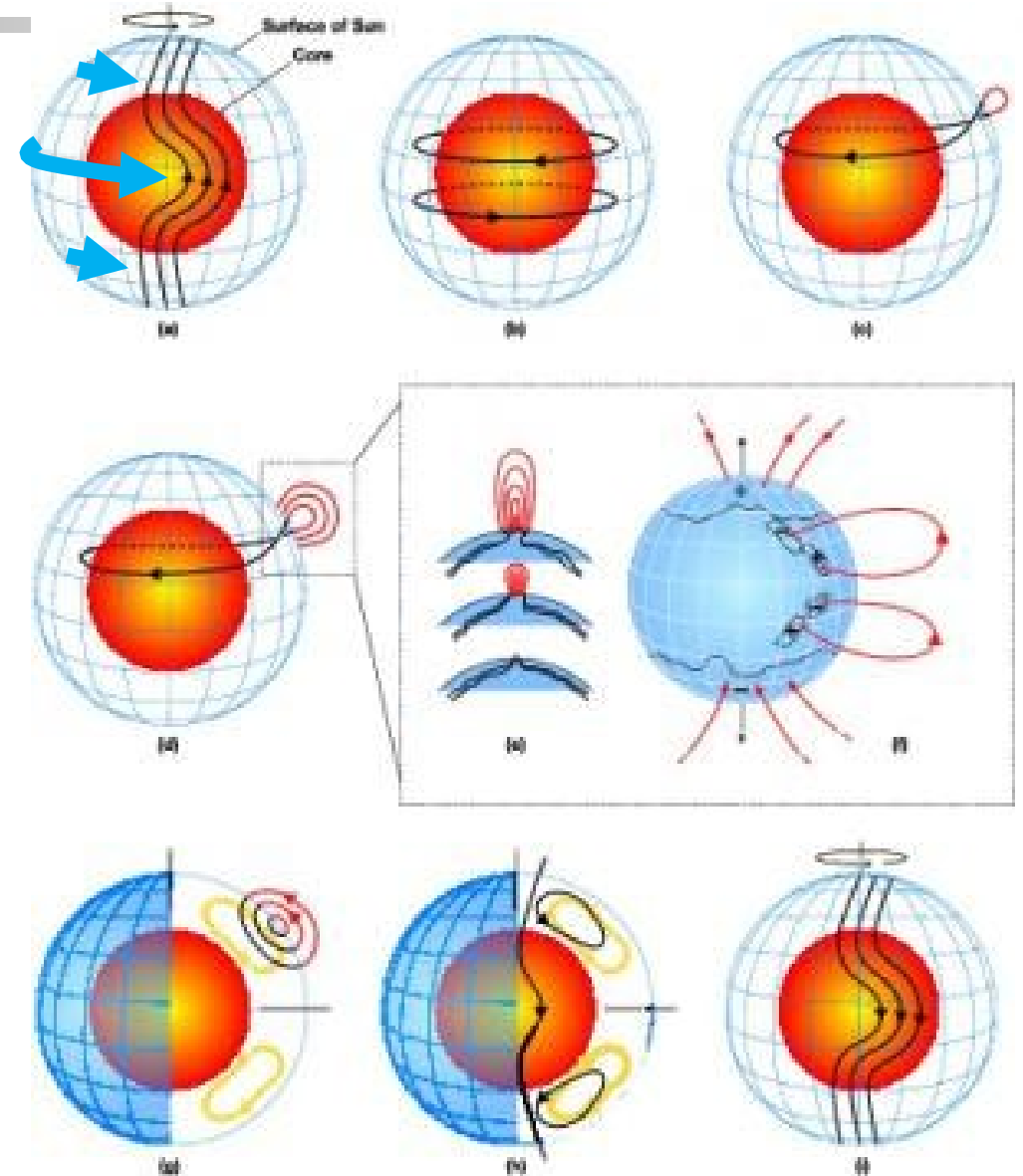
小スケール磁場の非線形フィードバック効果

トロイダルプラズマにおける帯状流との共通性

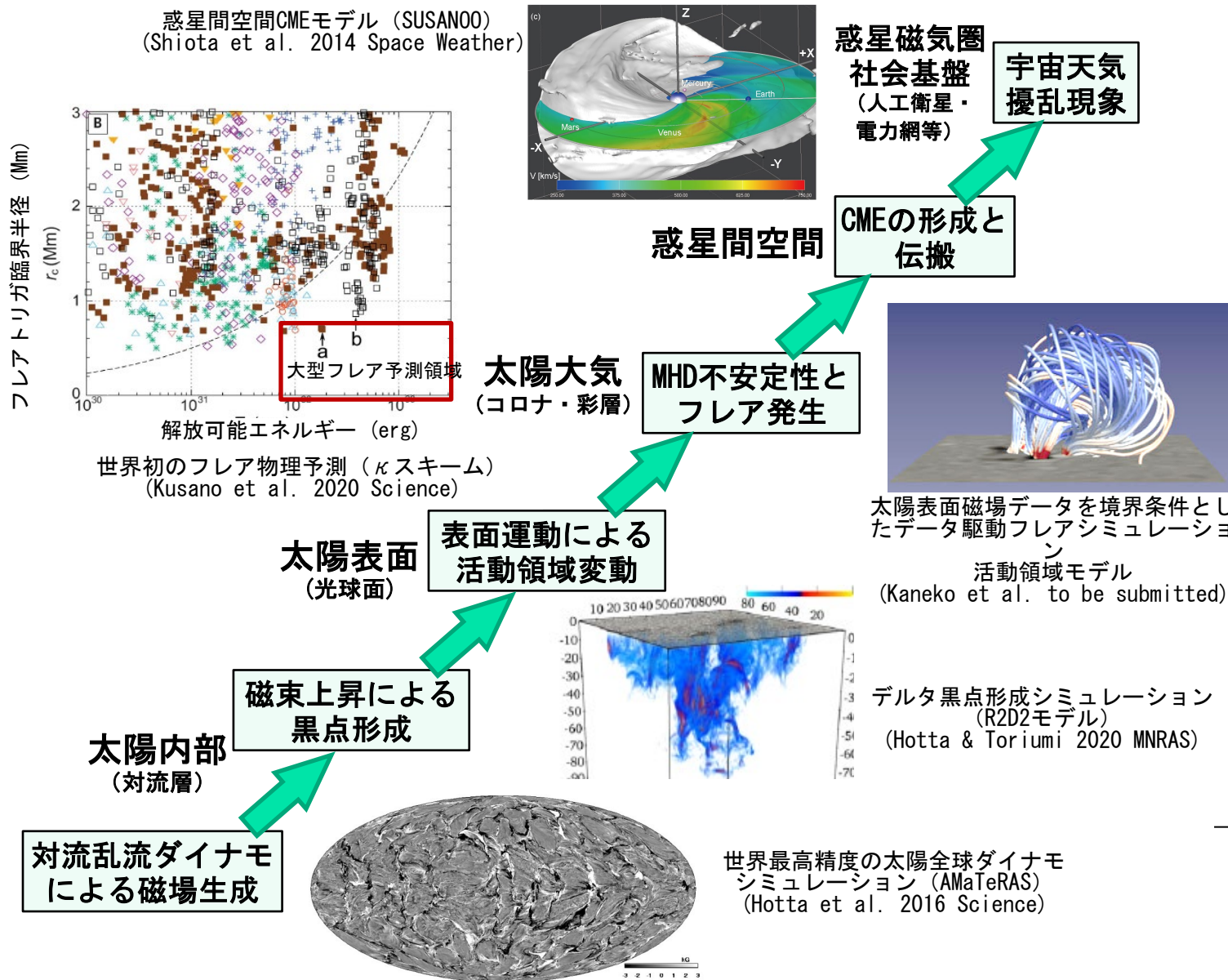
近い将来、太陽周期の第一原理計算が実現する可能性大【ガリレオ以来の400年の謎の解明】



(近々発表予定)



# 太陽・太陽圏包括モデルの試み



- 恒星対流層から惑星間空間までを包括した太陽面爆発現象の理解と先進予測の実現  
【科研費基盤A】代表: 草野完也
- 太陽活動と惑星環境変動の解明  
【富岳成果創出加速プログラム: サブD】代表: 草野完也

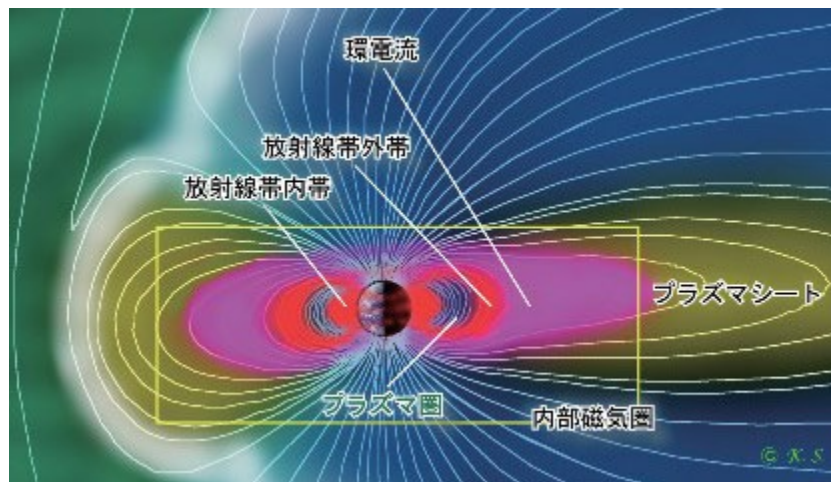
太陽の内部(対流層)と外部(コロナ・太陽圏)を結合した包括モデルを開発することで、黒点形成(対流・ダイナモ)とフレア・CME活動の物理的関係を解明する。

- ・早期予測: 黒点形成初期に巨大フレアの発生を予測できるか?
- ・べき乗則: フレアの規模頻度分布はなぜ、べき乗則に従うのか?
- ・最大フレア: 太陽で発生し得る最大フレアの規模と頻度は?

核融合統合シミュレーションの試みとの共通性

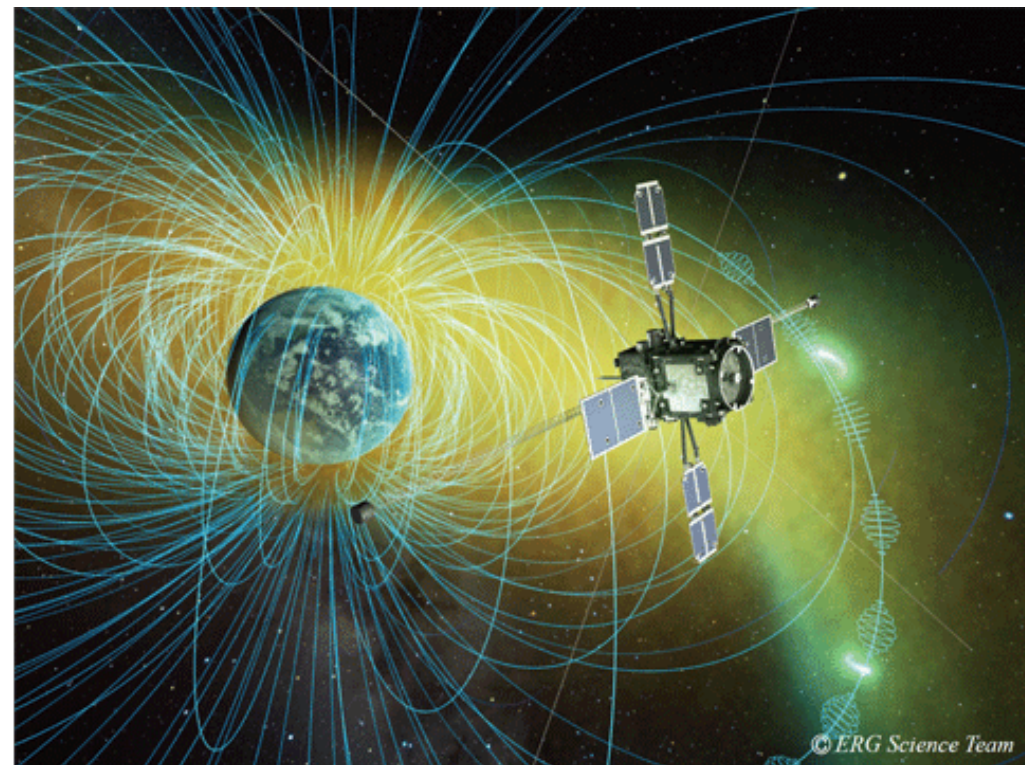
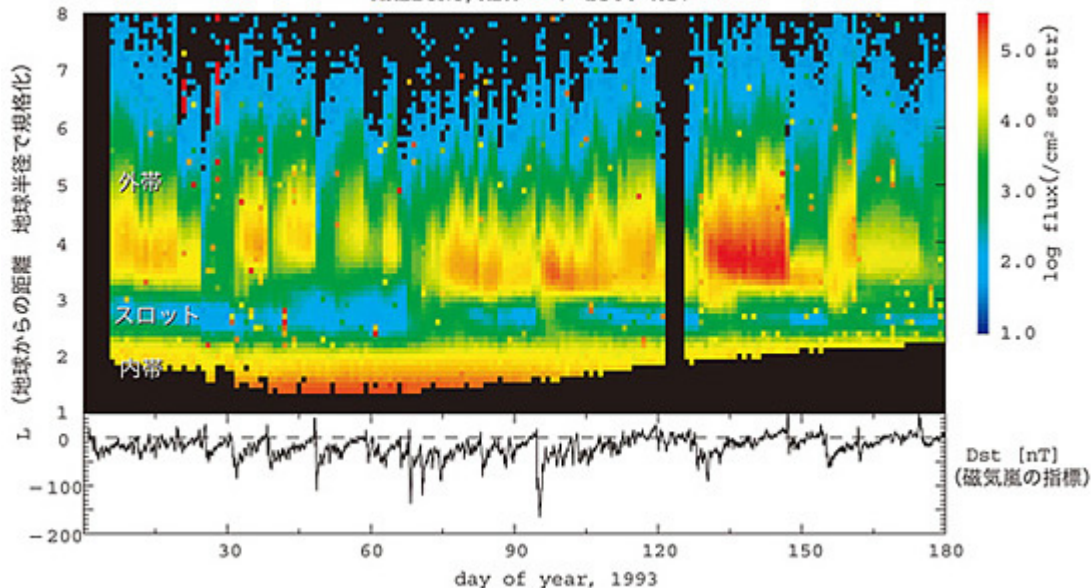
# ③波動粒子相互作用

## ■ 地球磁気圏と放射線帯



エネルギー階層:  
数eV~数十MeV

AKEBONO/RDM > 2500 keV



ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)  
放射線帯の変動機構の解明  
ISEE統合データサイエンスセンター  
「ERGサイエンスセンター」  
名大ISEEとJAXA宇宙研の共同運営



# NIFSとの共同研究の提案 (ISEE三好教授)

## 1. 磁気圏と室内実験における波動粒子相互作用

磁気圏 (ミラー型磁場) : 「あらせ」衛星の観測 周波数変調型の波動励起、波動と粒子のエネルギー交換過程の直接計測、  
 相対論的電子加速、電子・イオン散乱の観測

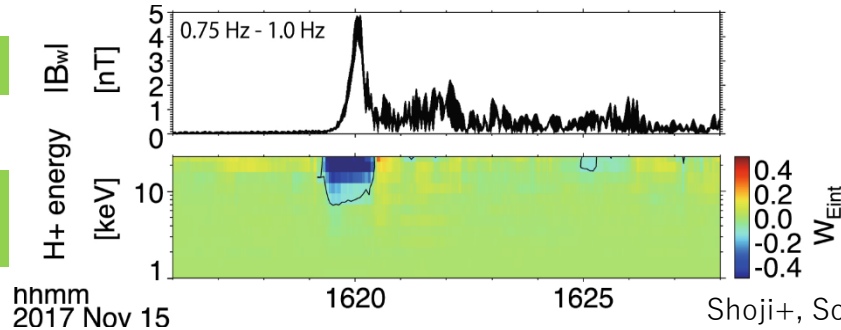
実験室 (ミラーマシン) : 周波数変調するホイッスラー波の励起

UCLA Large Plasma Device (LAPD)

### あらせの観測

EMIC波動の励起

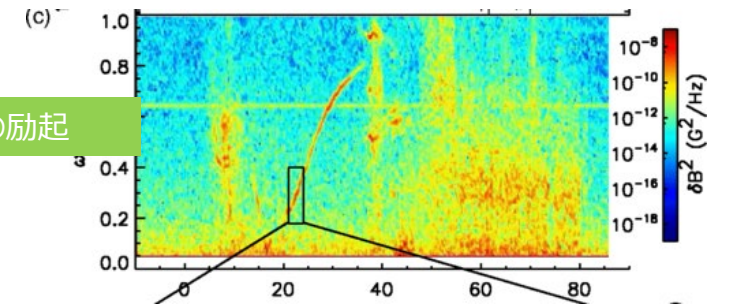
プロトンから  
波動へのエネルギー授受量



Shoji+, Sci. Rep. 2021

### 実験室

コーラス波動の励起



Compernelle, Gekelman+, 2015, PRL

## 2. アルフベン波、アルフベン乱流によるオーロラ電子加速

磁気圏 : 「れいめい」衛星 Dispersive Alfvén波によるオーロラ電子加速 (次期オーロラ衛星FACTORSを提案中)

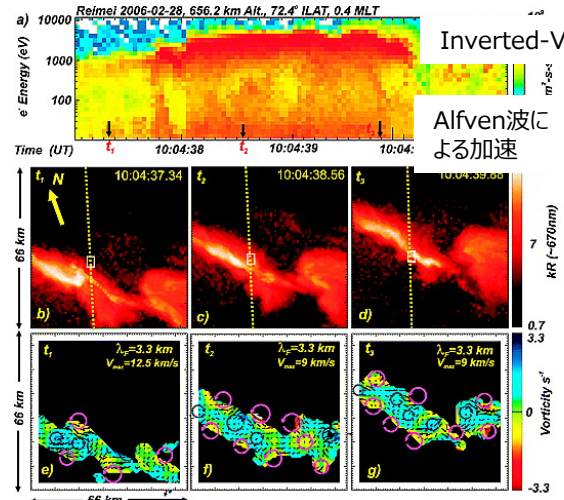
実験室 : Alfvén波によるオーロラ電子加速

### れいめいの観測

アルフベン波による  
電子加速

オーロラ光学発光

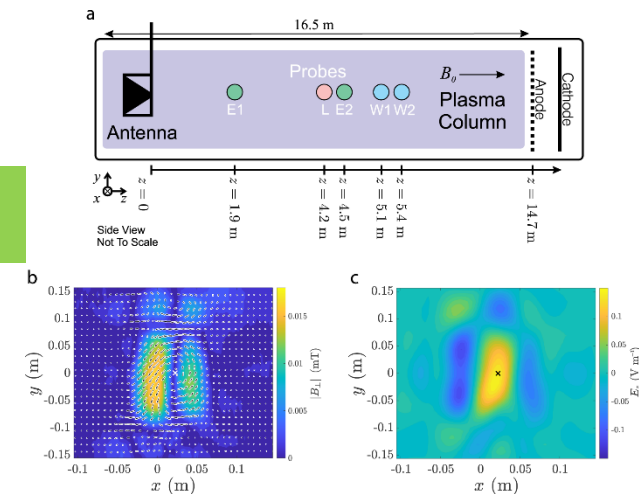
オーロラ渦度の分布



Chaston+, JGR, 2011

### 実験室

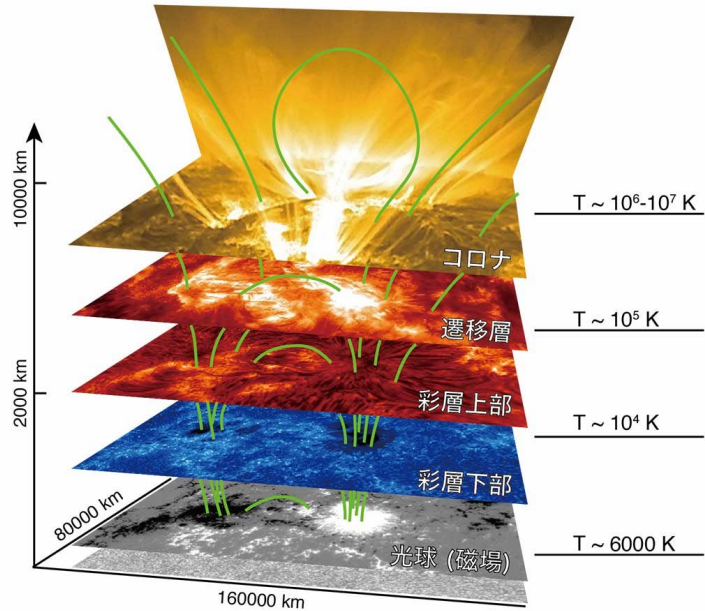
アルフベン波による  
電子加速



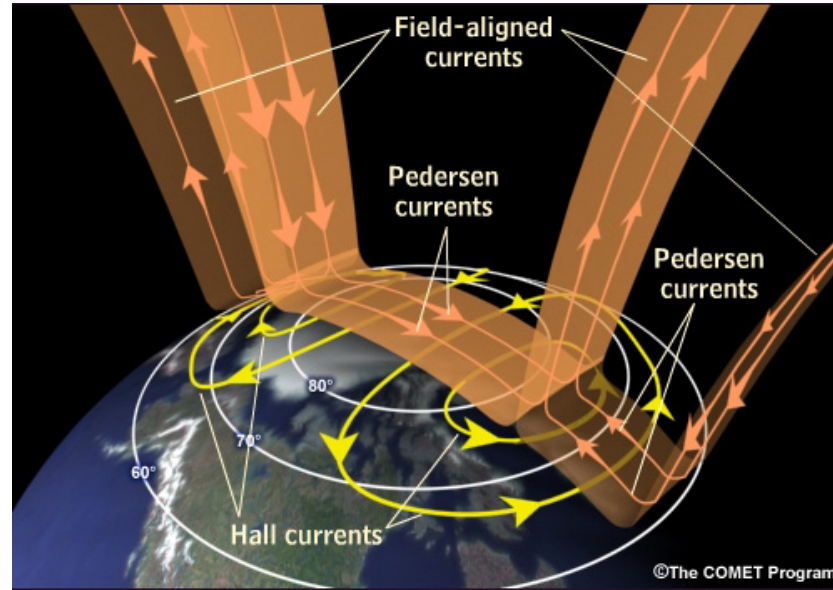
Schroeder+, 2021 Nature Com.

# ④境界領域(完全電離・部分電離プラズマ結合)

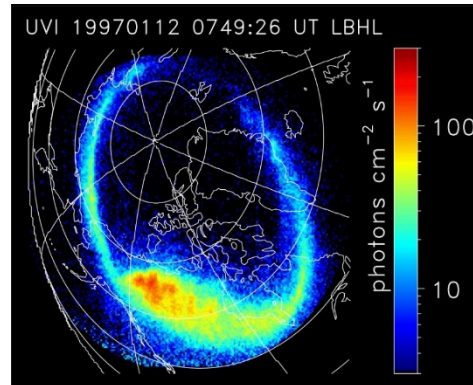
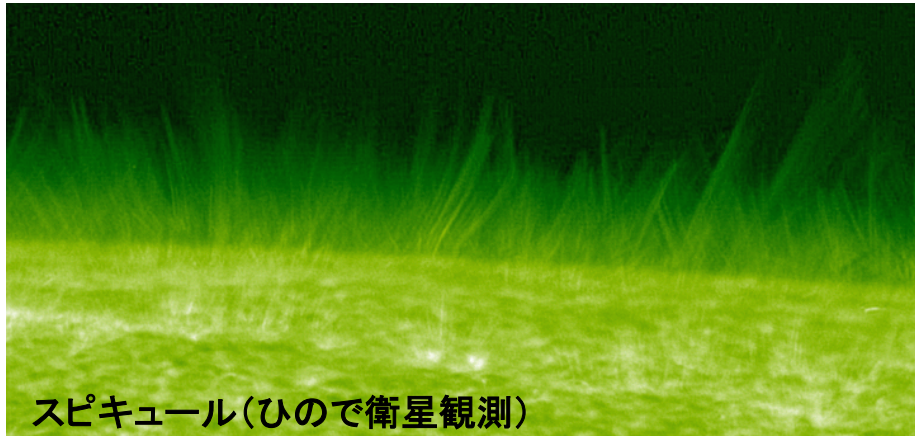
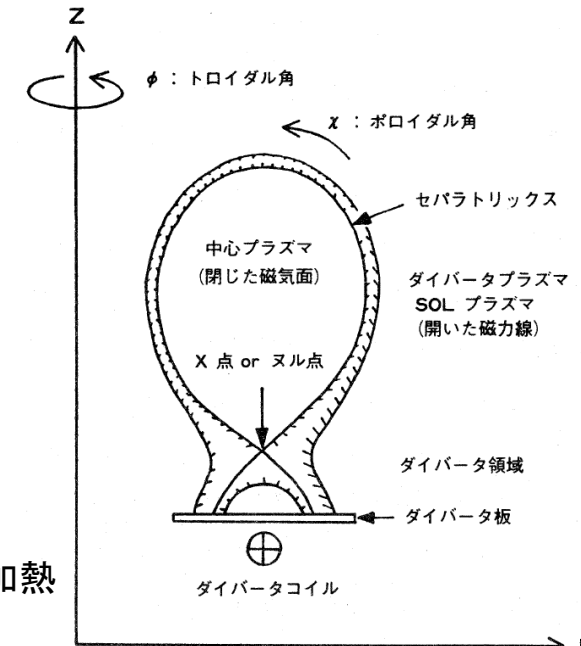
## ■ 太陽(彩層-コロナ結合)



## ■ 地球(磁気圏・電離系結合)



## ■ 核融合 (ダイバータプラズマ)



オーロラ電流系のジュール加熱

- 大気膨張
- 空気抵抗の増加
- 人工飛行体の落下

ジュール加熱の定量的見積もり

イオンと中性大気の衝突断面積などの原子分子素過程の知見が必要。

→ 核融合研の知見とデータベースは重要

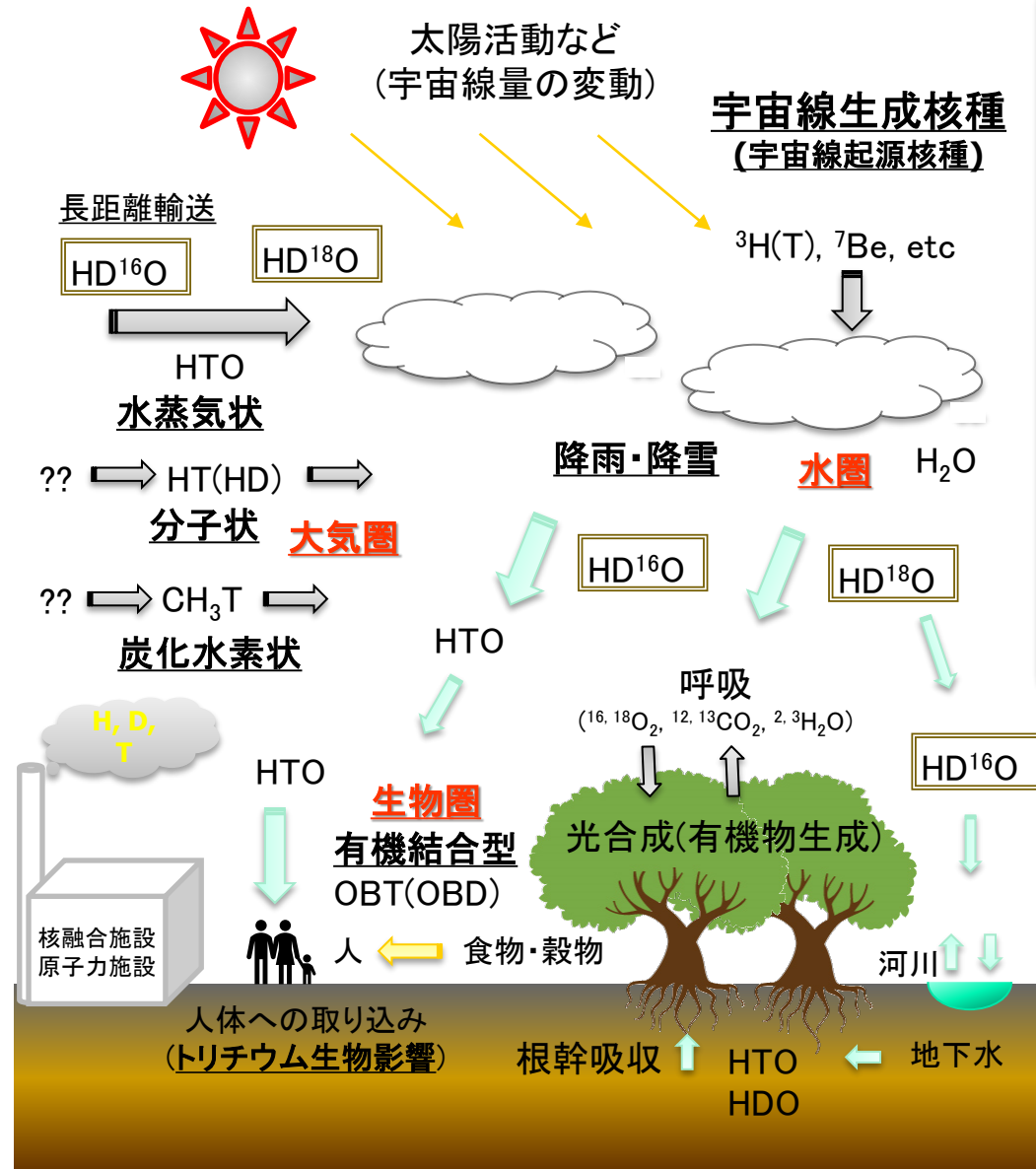
(ISEE家田助教)

滝塚(1990)

# ⑤ 同位体科学 (地球環境科学との協同研究)

大気圏-水圏-生物圏をつなぐ水素同位体環境挙動・循環研究協力  
(ISEE栗田准教授)

- ・NIFSトリチウム分析技術
- ・ISEE水輸送モデル (トリチウムの全球分布計算可能)



## NIFSにおける環境生物研究の目的

核融合炉から定常放出されるトリチウムの環境挙動・生物影響の総合的理解

### トリチウム環境挙動・生物影響研究:

- ・トリチウムや低線量の生物影響研究 (大学・研究機関と共同研究を通じて推進)
- ・環境中トリチウム挙動研究: 施設周辺(局所)
- ・環境水中トリチウム挙動・循環の理解
- ・植生・生物中有機結合型トリチウム分析手法の確立とその挙動研究
- ・大気中トリチウムの挙動や、分子状/炭化水素状トリチウム起源の探求

### 宇宙地球環境研究所への期待

- ・水素同位体環境挙動・循環研究への相互協力:
- ・安定同位体を含むマルチトレーサーによる環境物質循環の議論・解明
- ・大気圏-水圏-生物圏をつなぐ大局的な観測と環境研究の相互協力
- ・AMSなどによる同位体・元素組成分析

# 何を研究課題に選ぶか

やりたい研究  
(科学的興味)

やるべき研究  
(使命感)

他の人はやれないと思っているけど  
やれる(と自分は考える)研究  
(実現可能性)

やらなくてはならない研究  
(組織のミッション)