



平成30年度地球シミュレータ利用報告会
品川グランドホール、2019年3月5日



太陽地球圏環境予測プロジェクト(PSTEP)

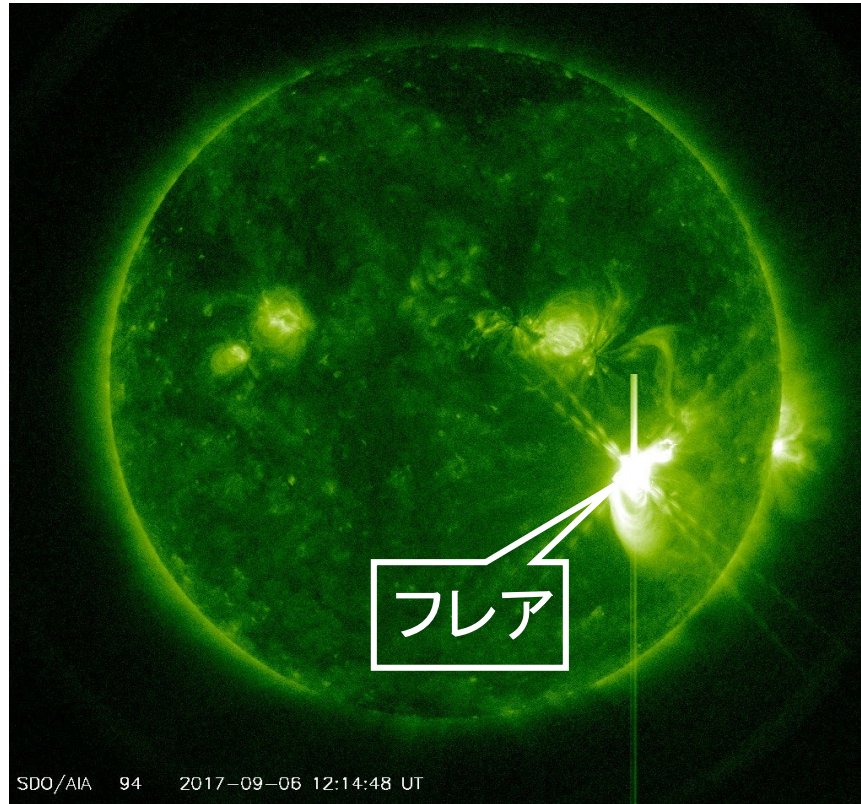
草野完也

名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)

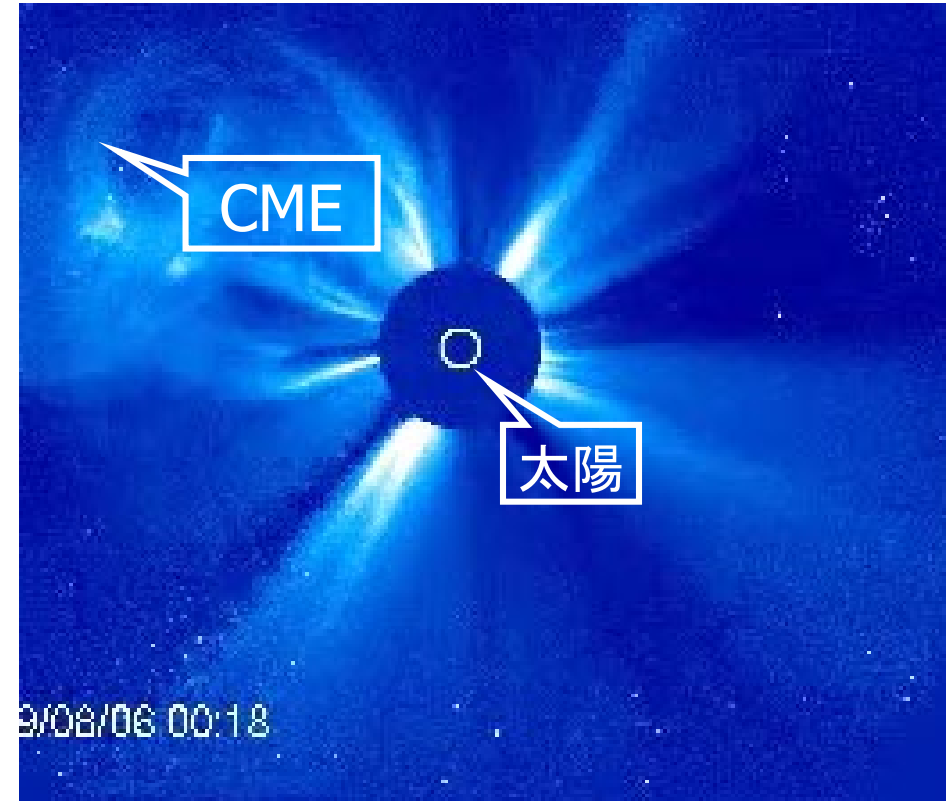


太陽面爆発：フレアとCME

太陽系最大の爆発現象：太陽磁場に蓄積された $10^{32} \sim 10^{33}$ erg（水爆の1億個に相当）のエネルギーを宇宙空間に放出



太陽フレア：太陽表面とコロナからの突発的な発光（電磁波放射）を伴う爆発現象



CME(コロナ質量放出)：大量のコロナプラズマが爆発的に惑星間空間へ放出される現象

太陽

フレア

高エネルギー粒子

地球到達時間
30分～2日

X線放射 8分

CME

太陽風擾乱

2～3日

熱圏擾乱

宇宙放射線

衛星障害

被ばく影響

通信障害

電離圏擾乱

電力障害

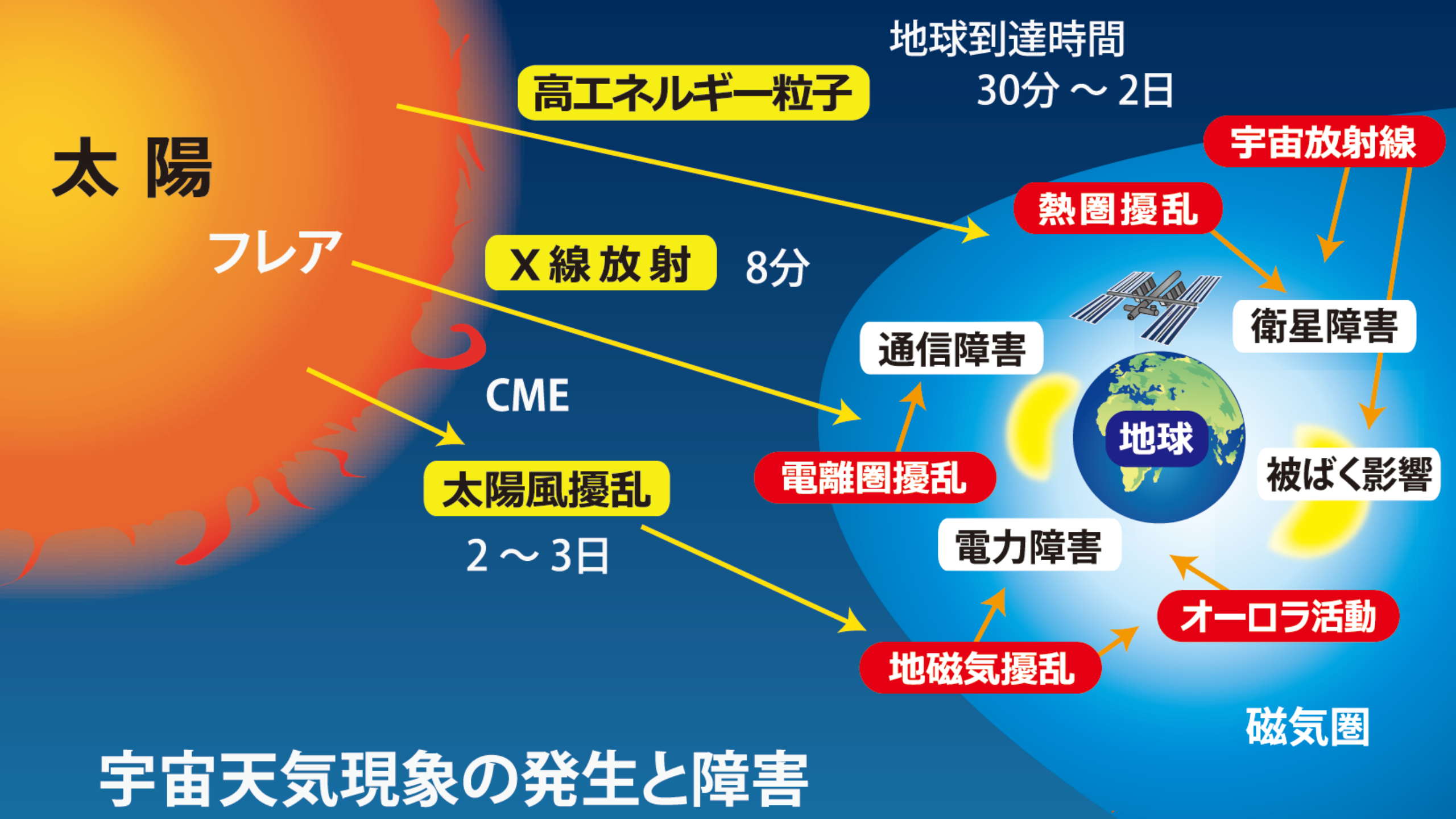
地磁気擾乱

オーロラ活動

地球

磁気圏

宇宙天気現象の発生と障害



太陽面爆発に起因する社会影響

■ 宇宙放射線

- 衛星帯電・被曝(大フレア時に約100mSv被曝の可能性)
 - 2014年1月ISSへの補給機打上延期
- 航空機被曝(大フレア時に約4mSv被曝の可能性)
 - 2012年1月アメリカ連邦航空局が極航路の一時的変更を勧告

■ 電離圏擾乱による測位・通信障害

- デリンジャー現象によって短波通信が不通、航空無線等でも障害
- GPS測位精度低下

■ 大気抵抗変動による衛星影響

- 衛星軌道・姿勢影響(2000年7月:X線天文衛星「あすか」障害)

■ 地磁気誘導電流による電力網障害と停電

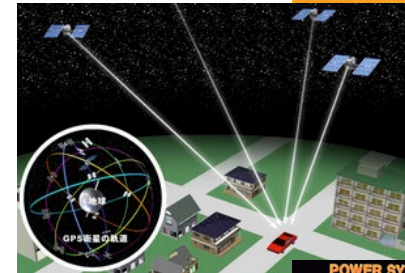
- 1989年3月の巨大磁気嵐($Dst \sim 589 \text{ nT}$)によりケベック州で大停電。

■ 気候影響

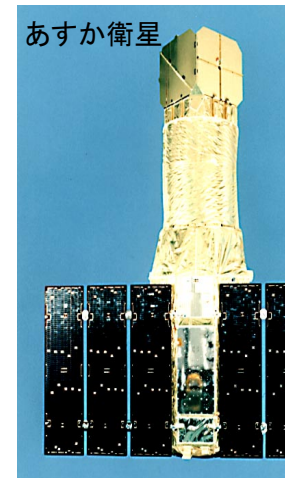
- 太陽活動の大極小期(グランド・ミニマ)における小氷期の発生可能性



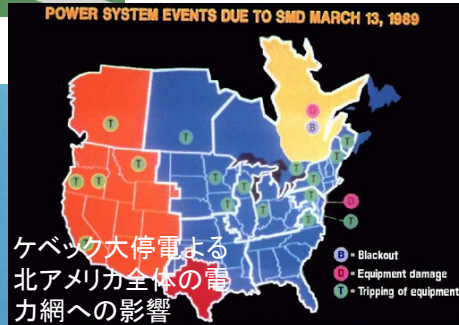
宇宙飛行士・航空機乗員乗客の被曝



測位・通信システムの障害



あすか衛星



地磁気誘導電流による電力網の障害

高エネルギー粒子による衛星帯電と放電

大気ドラッグによる衛星軌道への影響

激甚宇宙天気災害の可能性

■ 超キャリントン・クラス

- 樹木年輪中の炭素同位体解析 西暦774~775年及び、西暦992~993年に**キャリントン・イベントの10倍程度**の放射線急増事象が発生したことを発見 (名大: Miyake et al. 2012 *Nature*, Miyake et al. 2013 *Nature Comm.*)
- 太陽型恒星の超巨大フレアの可能性 (Maehara et al. 2012 *Nature*)

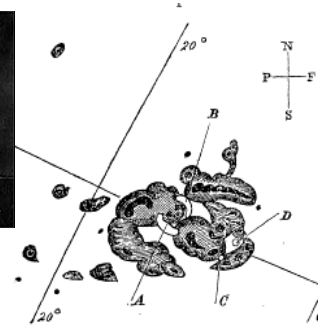
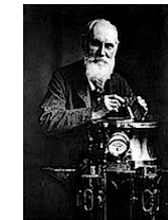
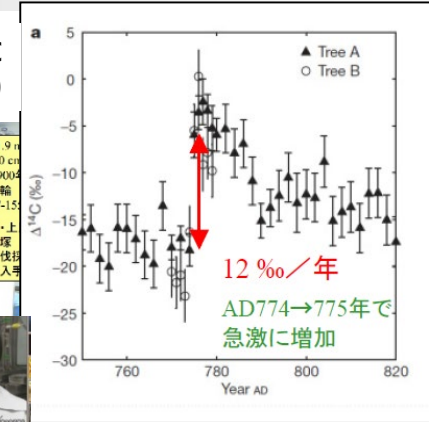
■ キャリントン・クラス

- 1859年9月 **Dst~-1760nT** (キャリントン・イベント)
現代において発生すれば、衛星障害、通信・測位障害など**全地球的な激甚宇宙天気災害**を引き起こす。(被害総額10~100兆円と試算)
- 2012年7月 推定Dst~-1182nT (地球に到達した場合の推定)
太陽の裏面で発生したため地球には到達しなかったが、もし2週間前に発生した場合、地球に到達し、大規模被害をもたらしたと考えられる。(Baker et al. 2013)

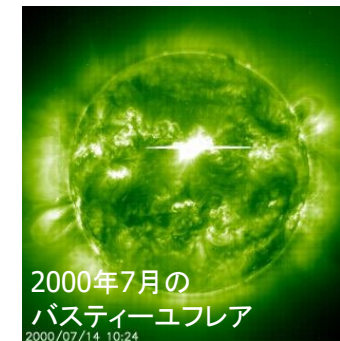
■ サブ・キャリントン・クラス

- 1989年3月 **Dst=-589nT** ケベック州大停電
- 2000年7月 **Dst=-301nT** X線観測衛星「あすか」制御不良
- 2003年10月 Dst= -422nT スウェーデン、南アフリカで送電システム障害、火星探査機Mars Odyssey障害

屋久杉年輪中の炭素同位体 ^{14}C 比の年変化 (Miyake+2012)



キャリントンによる黒点と白色光フレアのスケッチ (A, B, C, &D)



Dst: 地球磁気圏に流れる軸対称な環電流の強さを表す地磁気活動度指数

Dst (nT)

-2000

-1000



文部科学省科学研究費補助金

新学術領域研究(研究領域提案型) 平成27—31年度

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

科学的重要課題の 抜本的解決

- 太陽フレアの発生機構
- 地球放射線帯における粒子加速機構
- 太陽活動の気候影響プロセスの特定 など

大学・JAXA・国立天文台等

社会基盤としての 宇宙天気予報の飛躍的发展

- 社会に役立つ予測スキームの開発
(通信、電力、衛星・航空機等への影響予測)
- 激甚宇宙天気災害に備える宇宙天気
ハザードマップを世界に発信

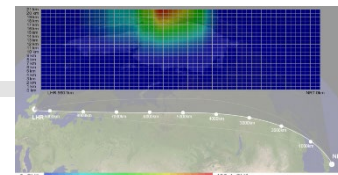
情報通信研究機構・電子航法研究所等

組織・学問領域を超えた連携

基礎科学研究と予測研究の相乗的发展

全国20機関より天文学・地球電磁気学・気象気候学など分野を超えた100名以上の研究者が参加

PSTEPのシミュレーション課題

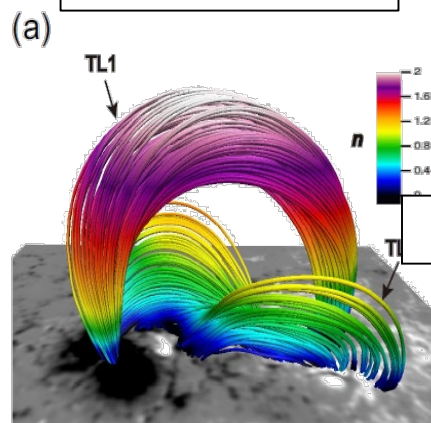


被曝

宇宙放射線被曝モデル
(原子力機構、極地研)

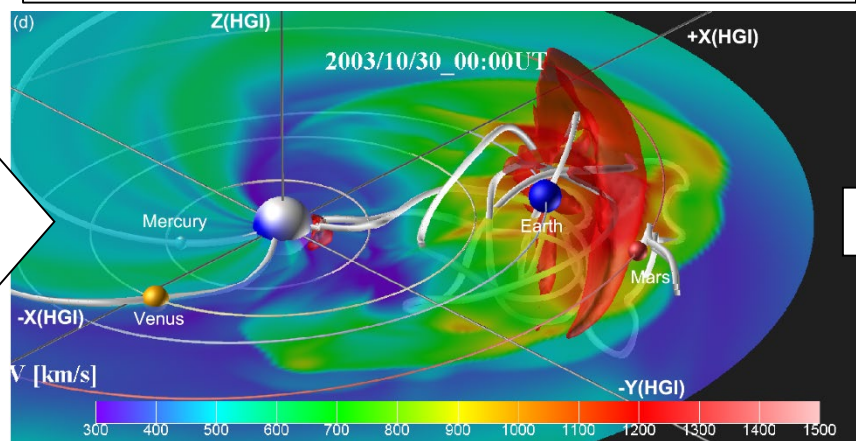
短波電波伝播シミュレータ
(NICT、電子航法研)

太陽フレアの
発生予測



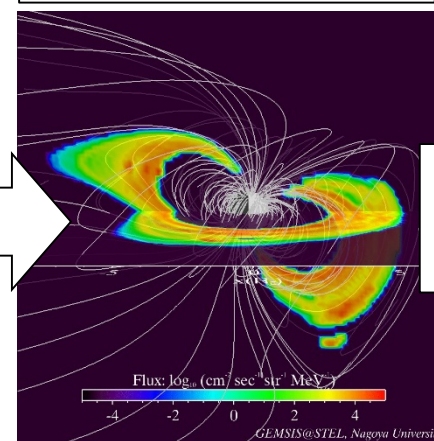
太陽黒点とコロナ磁場のモデル
(名大、JAXA、国立天文台)

コロナ質量放出・
太陽高エネルギー粒子の伝搬予測



太陽フレアとコロナ質量放出(CME)のモデル
(名大、NICT)

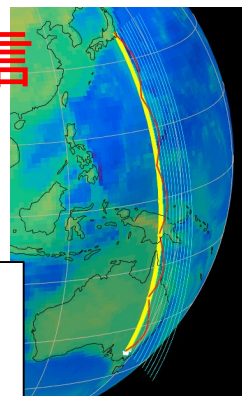
地球電磁気圏の
擾乱予測



地球電磁気圏・宇宙放射線のモデル
(名大、京大、NICT)

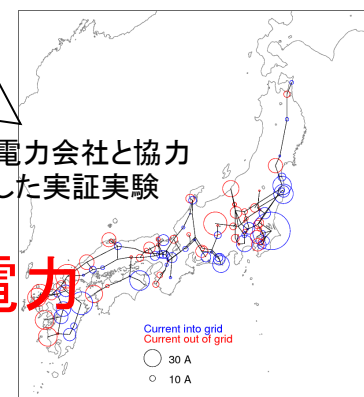
社会基盤への
影響予測

通信

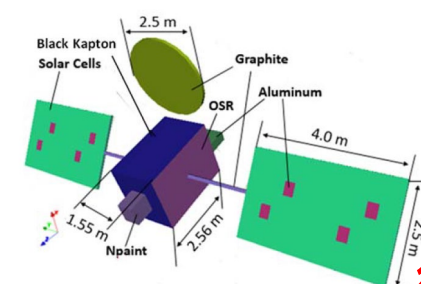


電力会社と協力
した実証実験

電力



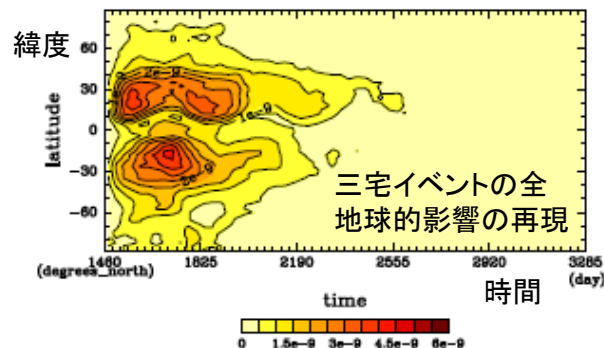
地質モデルを考慮した
地磁気誘導電流モデル(京大)



衛星帯電モデル(大阪府立大)

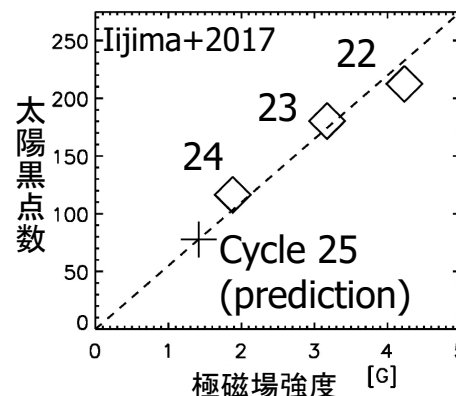
衛星

Be10_SPE01 deposition flux



宇宙線生成核種
の大気循環計算

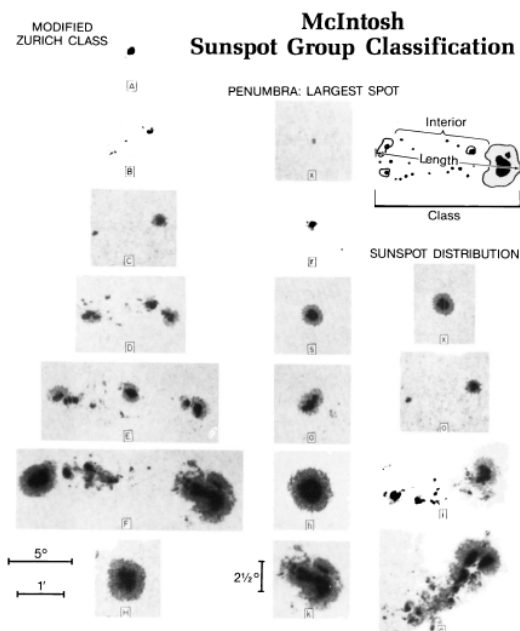
次期太陽周期
活動度の予測



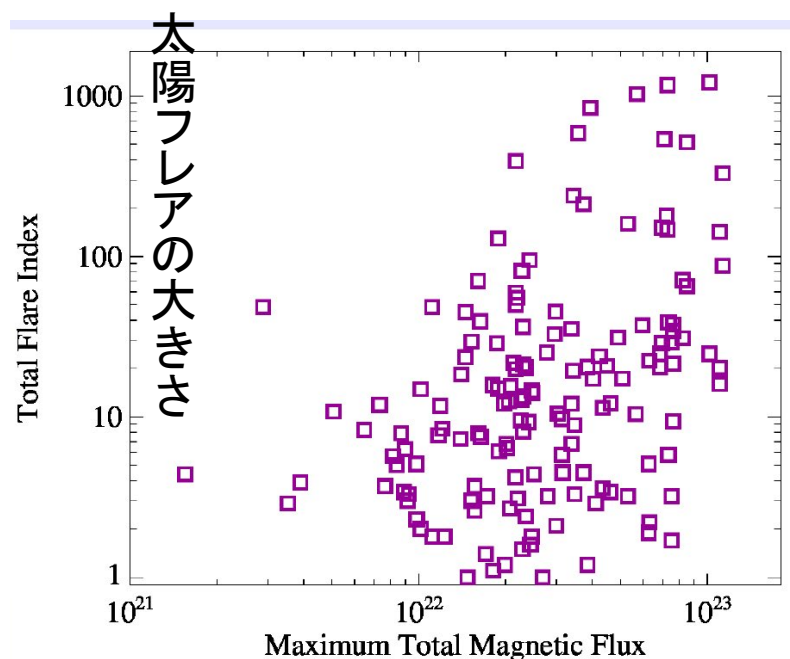
衛星帯電モデル(大阪府立大)

従来の太陽フレア予測

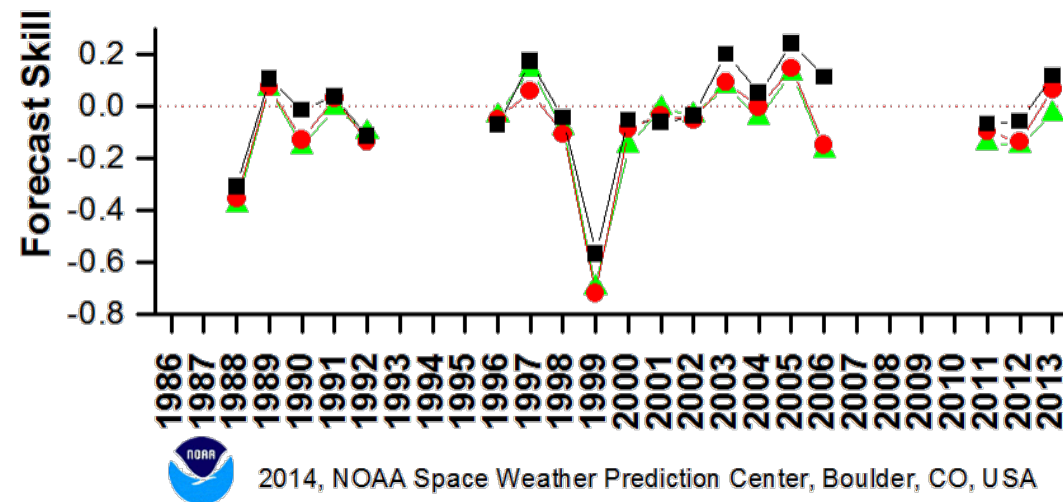
- 黒点の形態や大きさを使った経験的予測
- 大型フレアの予測は過去30年間、改善していない。



太陽黒点の形態分類
(McIntosh分類)



太陽黒点の磁場の量(磁束)



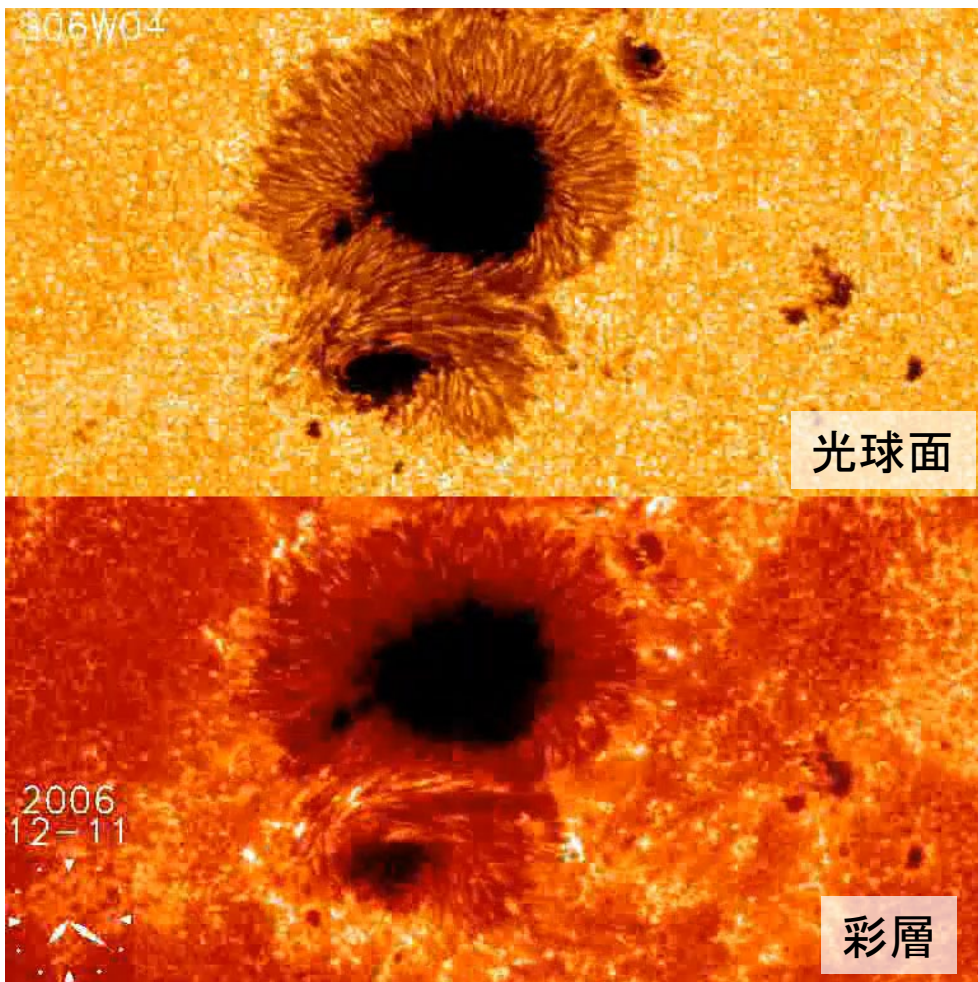
NOAA/SWPCによるXクラスフレア予測スキルの年推移

経験的予測の限界

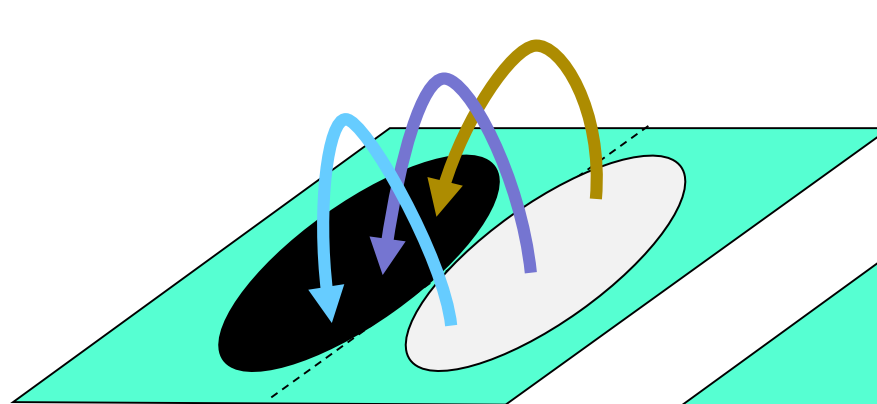


物理的予測の開発が急務

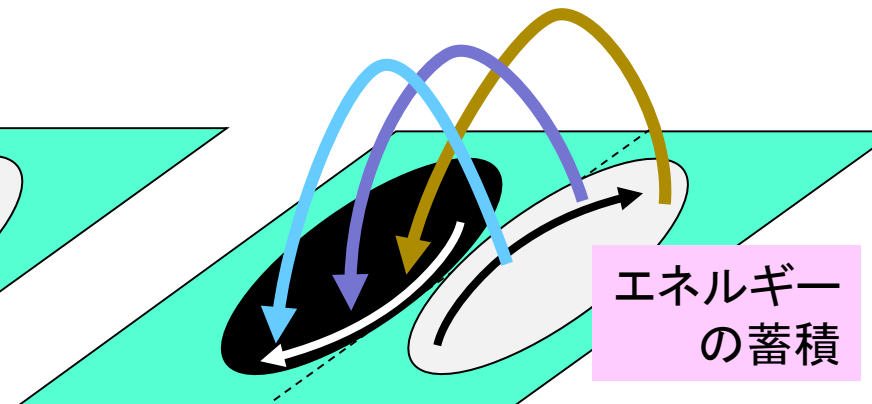
太陽フレアの発生機構



①黒点（活動領域）の形成

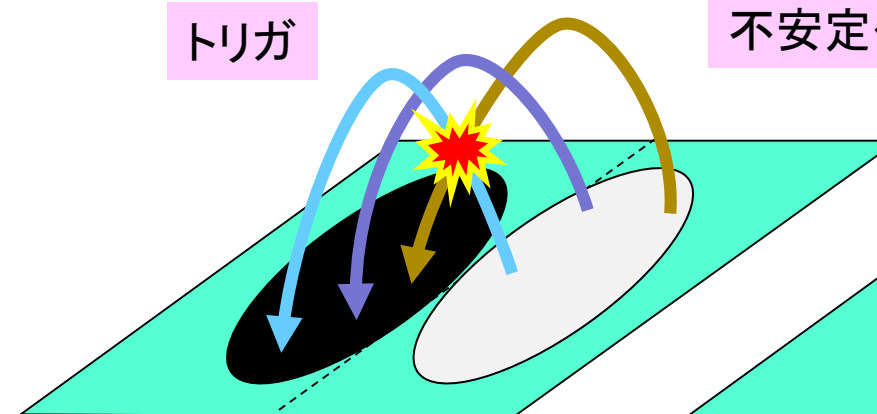


②磁力線の捻じれ



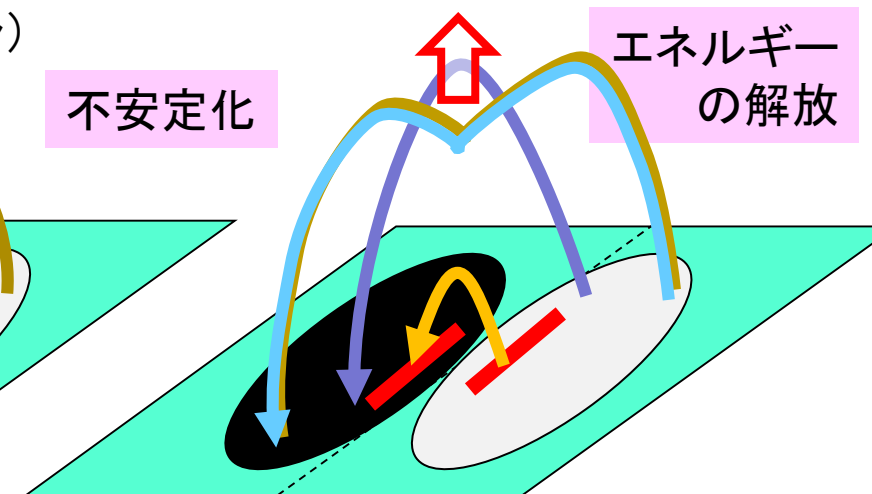
③磁力線のつながぎ替え
(磁気リコネクション)

トリガ



④プラズマと磁場の噴出

不安定化



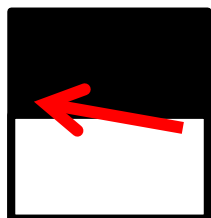
太陽観測衛星「ひので」が観測した黒点の変化とフレア(2006年12月)

■ いつ、どこで、どのように不安定化するか？ 9

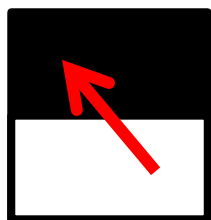
不安定化条件を探るアンサンブル・シミュレーション

K. Kusano et al., MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES
AND CORONAL MASS EJECTIONS, ApJ, 760:31, 2012 November 20.

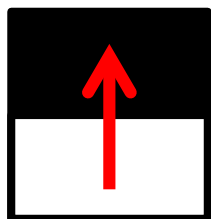
磁場の
ねじれ



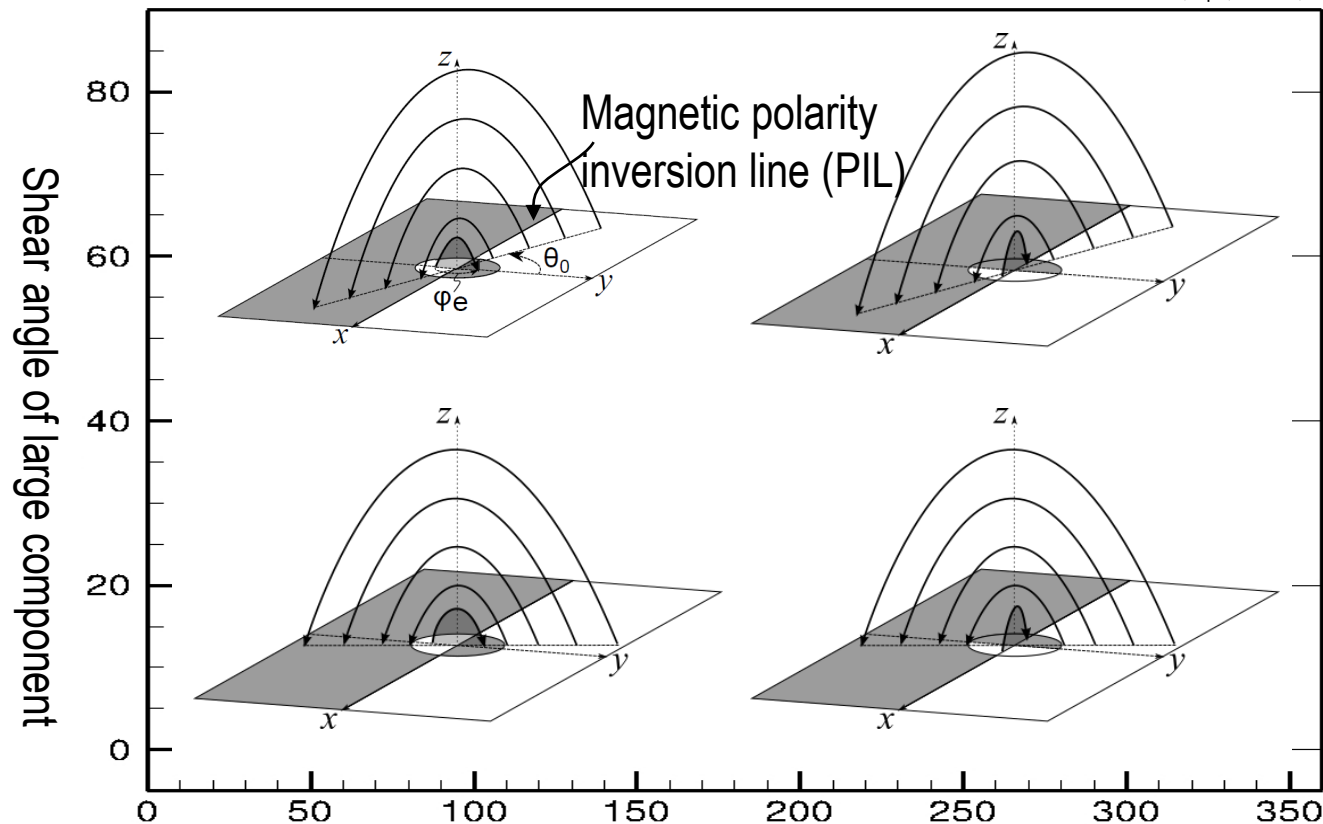
Strong shear



Weak shear

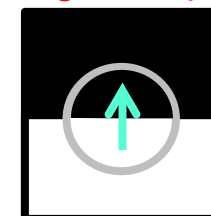
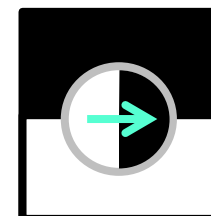
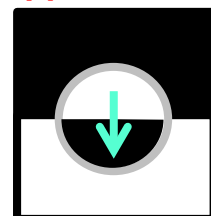
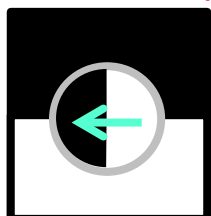
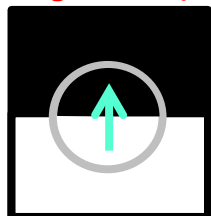


shear free
(potential field)

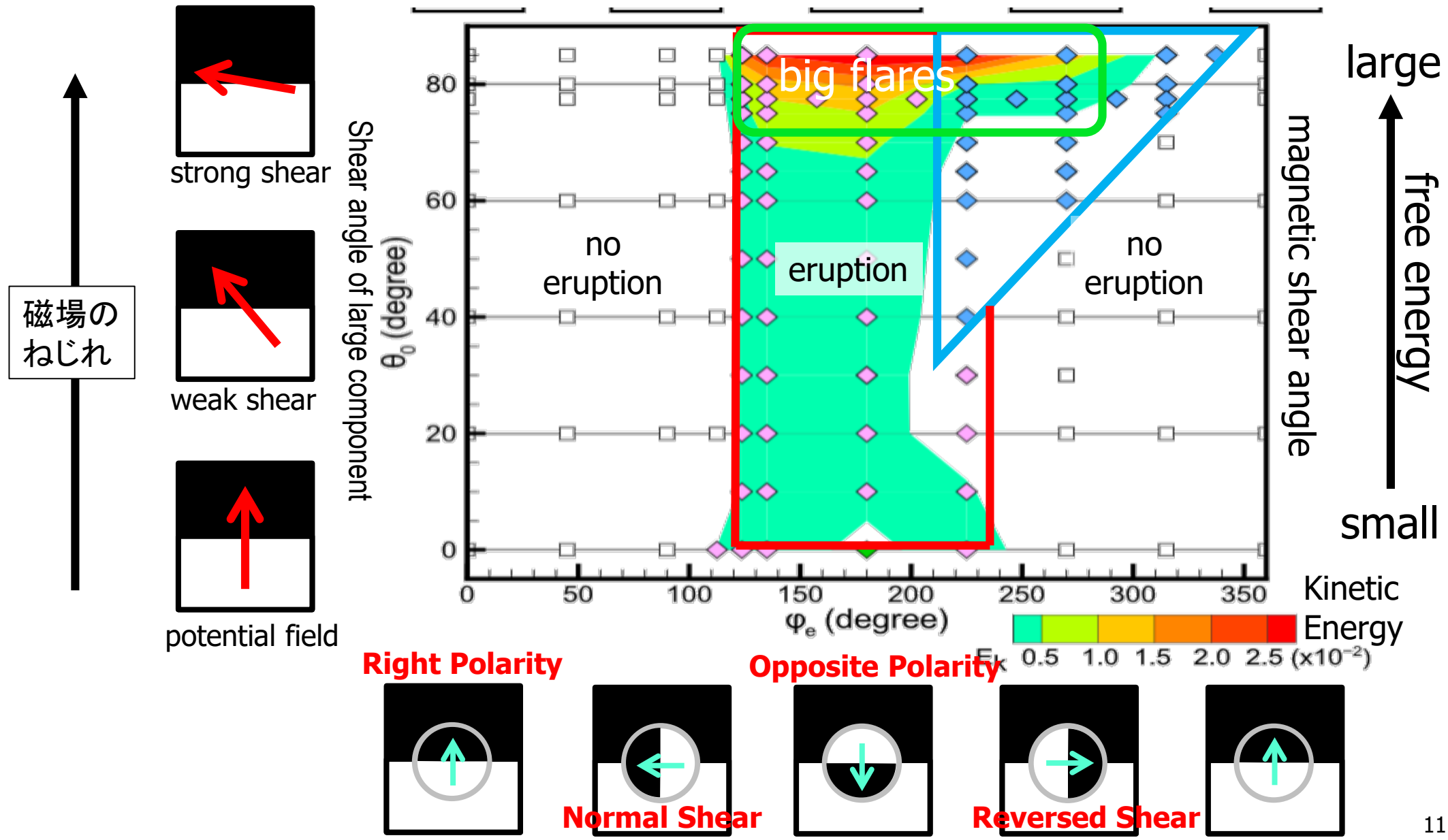


large
free energy
small

Right Pol (RP) Normal Shear (NS) Opposite Pol (OP) Rev Shear (RS) Right Pol (RP)



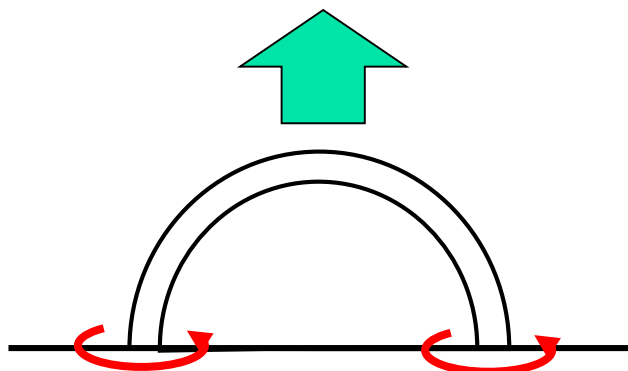
不安定化条件を探るアンサンブル・シミュレーション



不安定化の新しいシナリオ

Double-Arc Instabilityの臨界パラメタ

従来のシナリオ



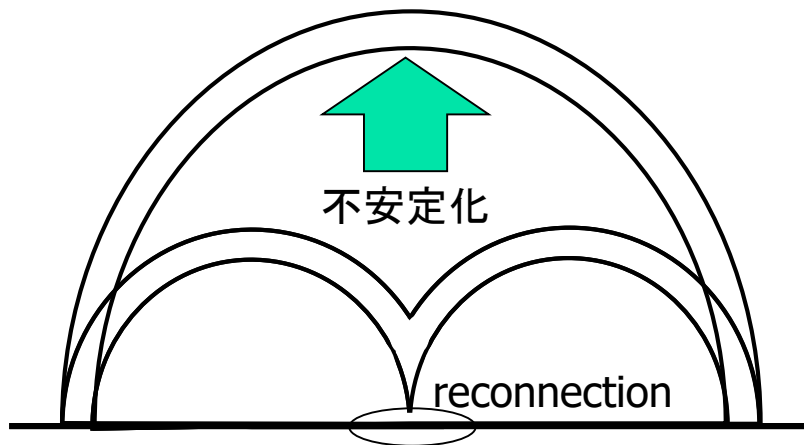
単純な磁気ループ

磁場のねじれによるエネルギー注入

不安定化

Kink mode instability
Torus instability

新しいシナリオ



ねじれた2つの磁気ループ

微小な磁気リコネクション(繋ぎ替え)

不安定化

Double-Arc Instability
(Ishiguro & Kusano 2017 ApJ)

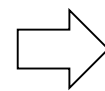
$$\kappa \equiv T_w \frac{\phi_{rec}}{\phi_{over}}$$

磁気ねじれ

磁気リコネクションを受けた
磁束とオーバーレイ磁束の比

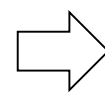
不安定化条件 $\kappa > 0.1$

強い
ねじれ



わずかなリコネク
ションで不安定化

弱い
ねじれ

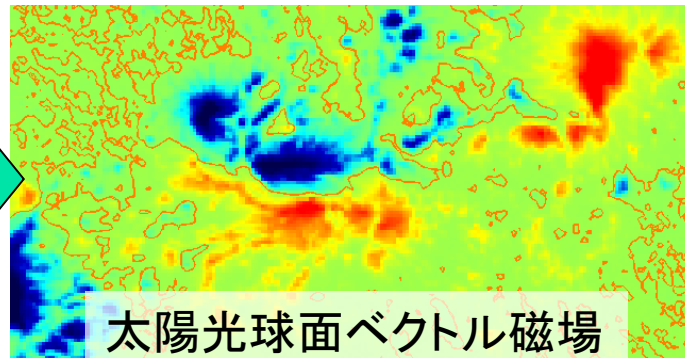


より大きなリコネクショ
ンが不安定化に必要

新しい不安定性理論に基づくフレア予測



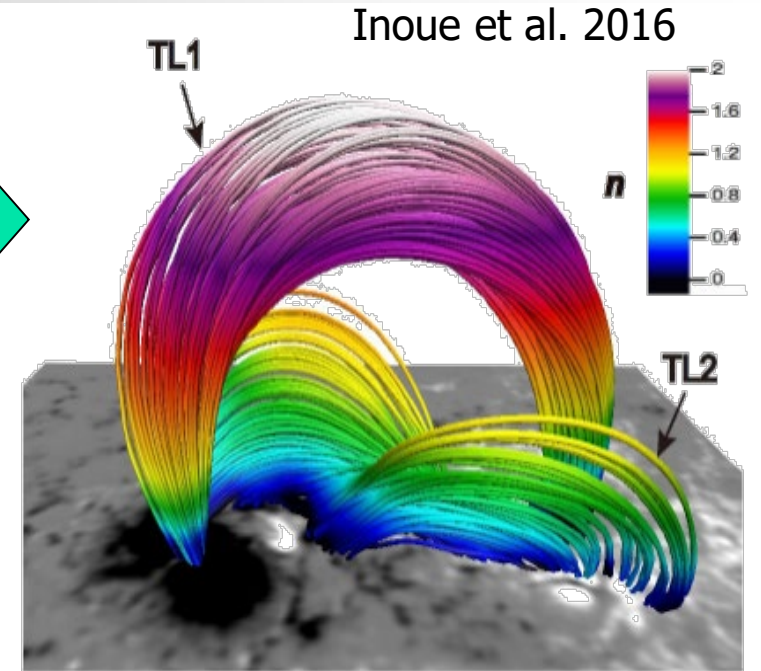
12分毎



太陽光球面ベクトル磁場

MHD緩和法

地球シミュレータによる計算



非線形フォースフリー3次元磁場

全ての磁力線の
磁気ねじれを計算

$$T_w = \frac{1}{4\pi} \int \alpha dl$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$

不安定化に必要な磁気リコ
ネクションの**臨界半径** r_c と
解放可能エネルギー E_r を
磁気中性線(PIL)上の
全ての点で計算

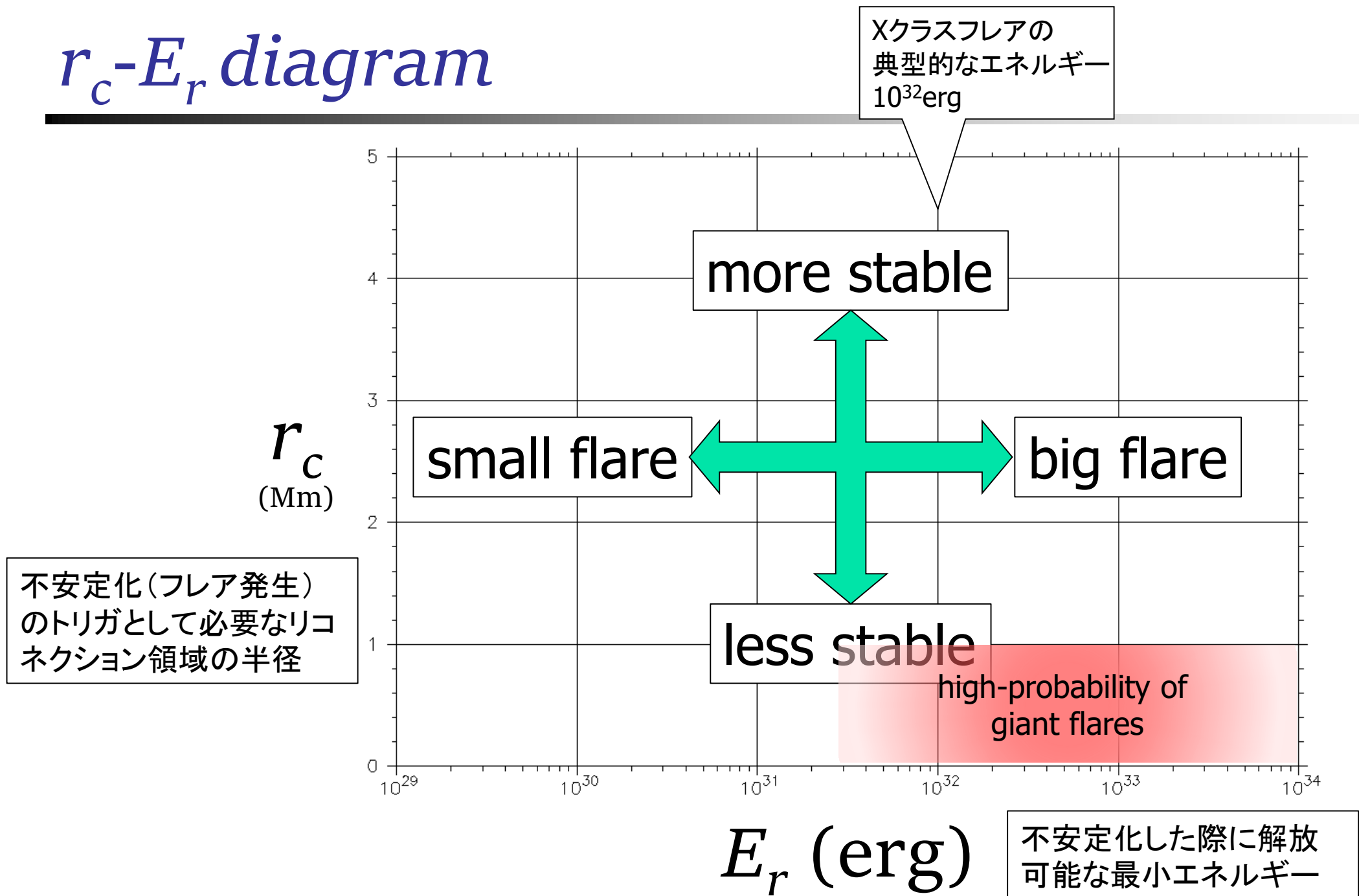
$$\kappa_r = \frac{\int_r T_w d\phi}{\Phi_{over}}$$

不安定化条件 ($\kappa_r > 0.1$)

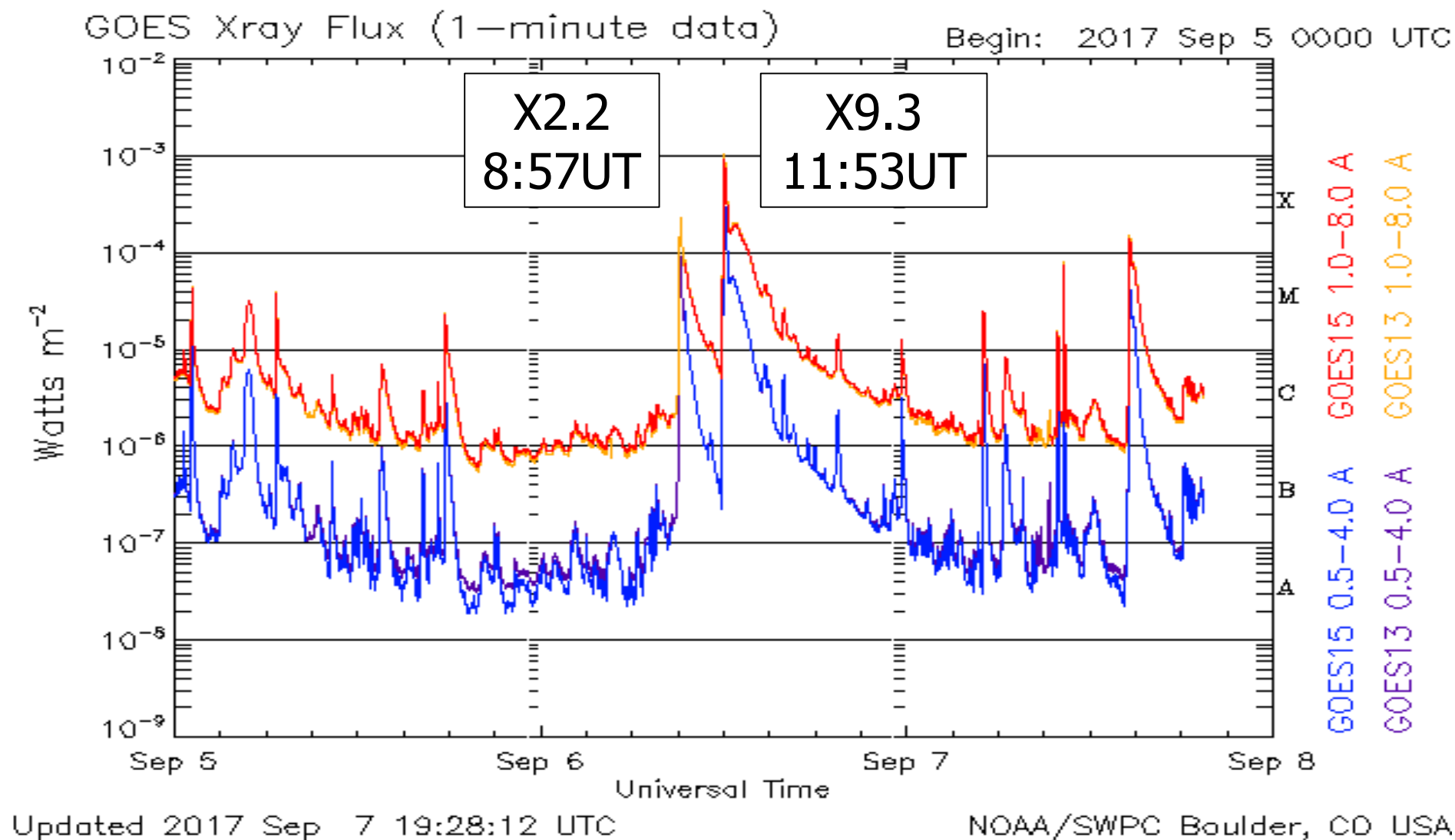
PIL

r_c

r_c - E_r diagram

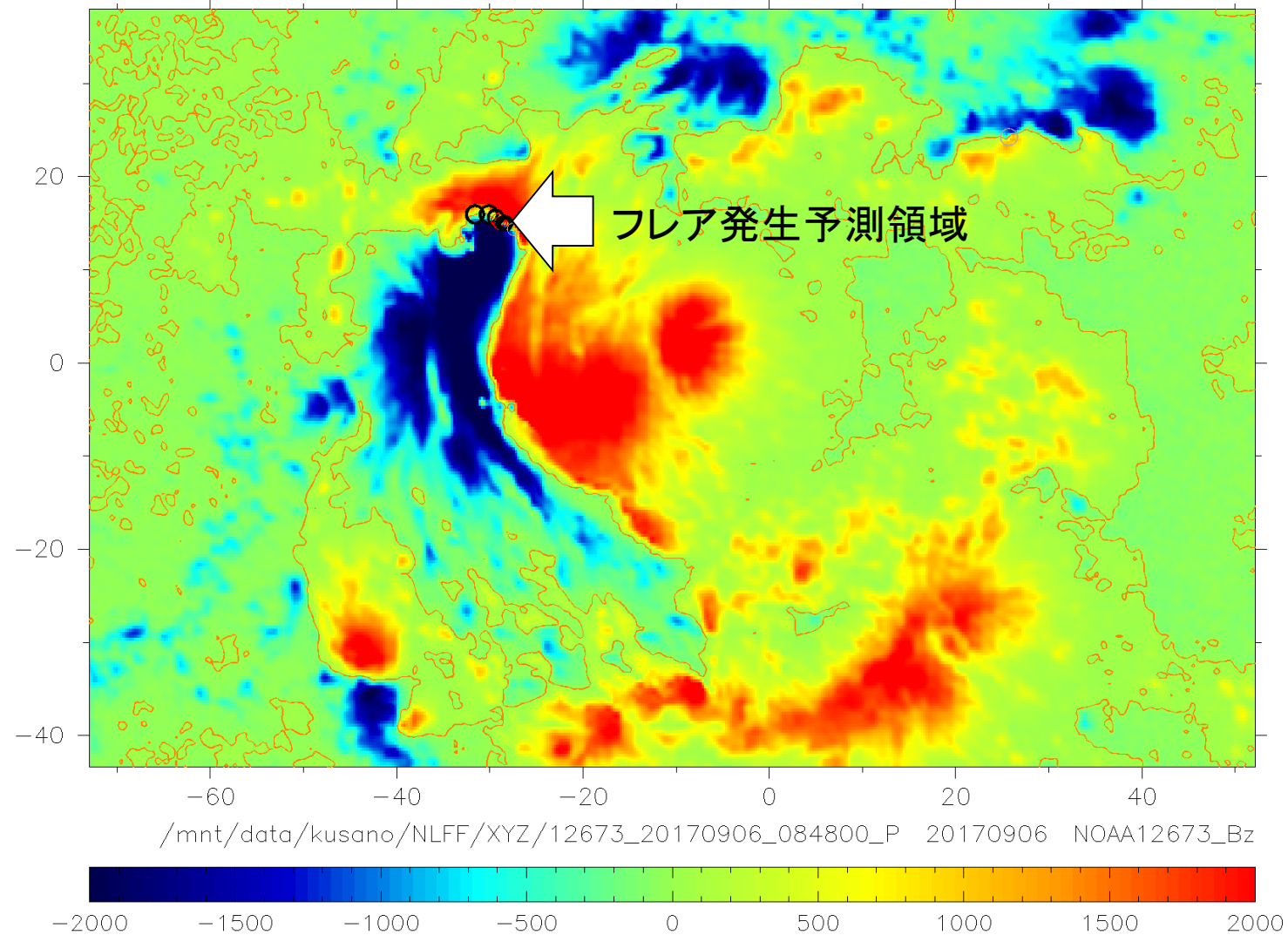


GOES衛星が観測した軟X線流束の時間変化



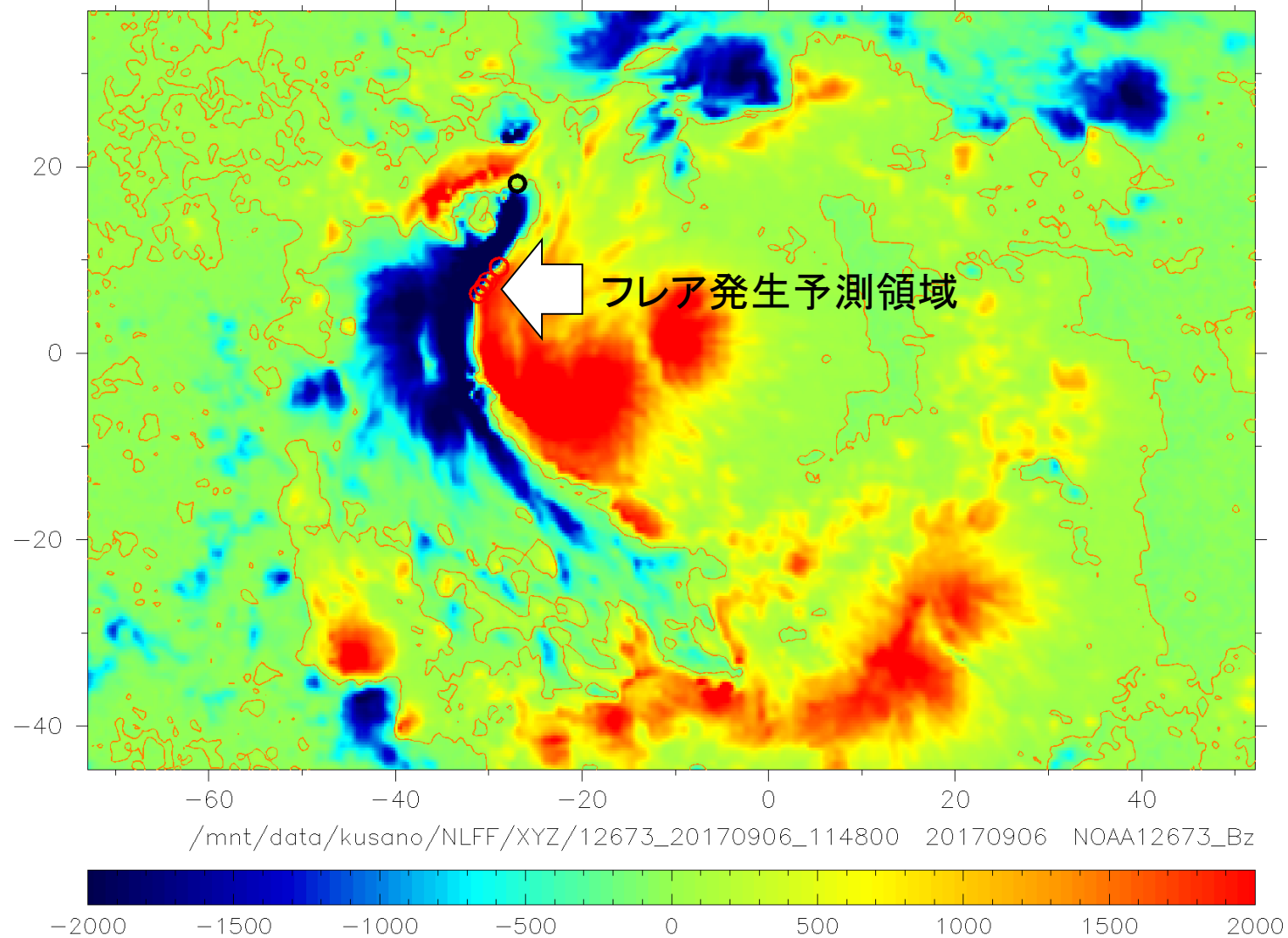
8:48 UT (X2.2フレアの12分前)

活動領域12673の磁場

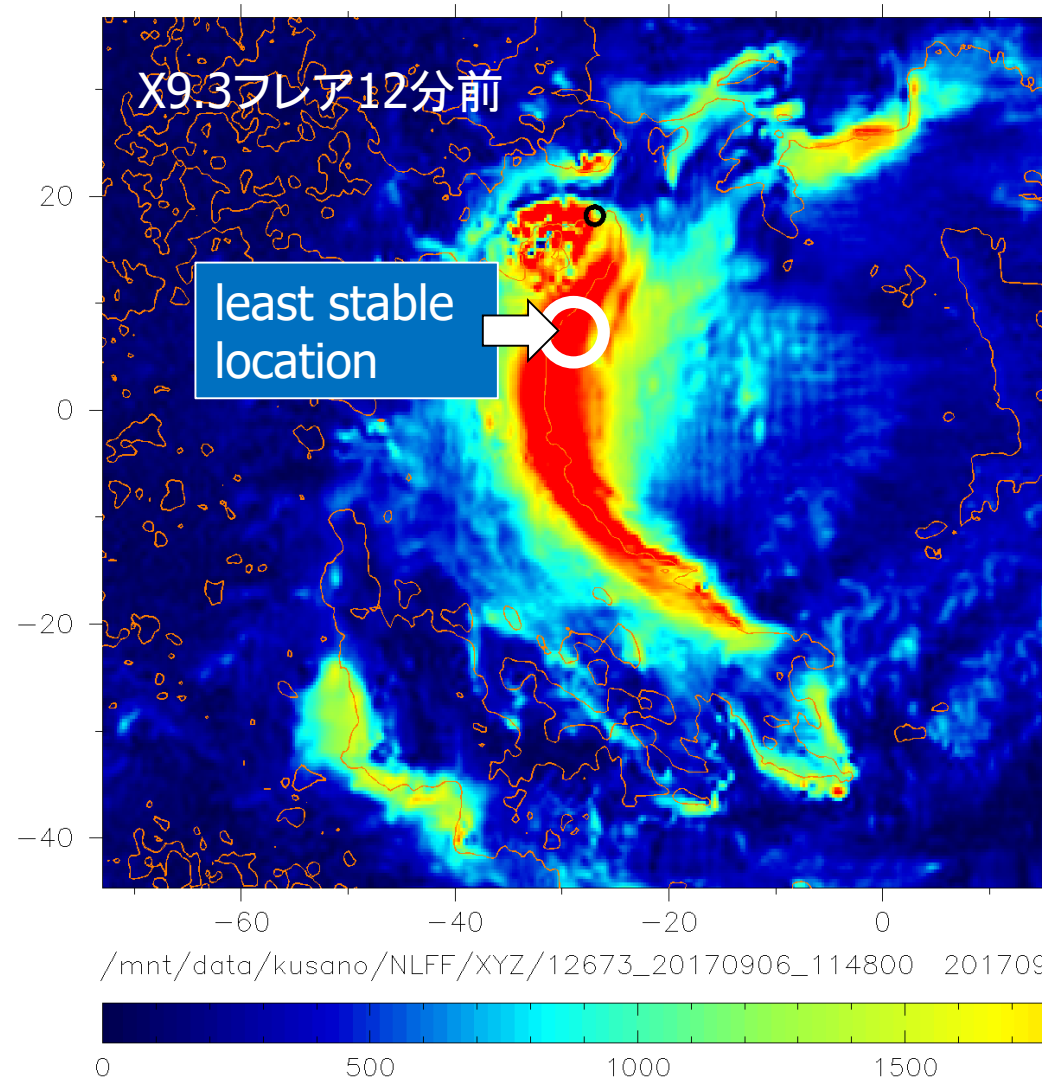
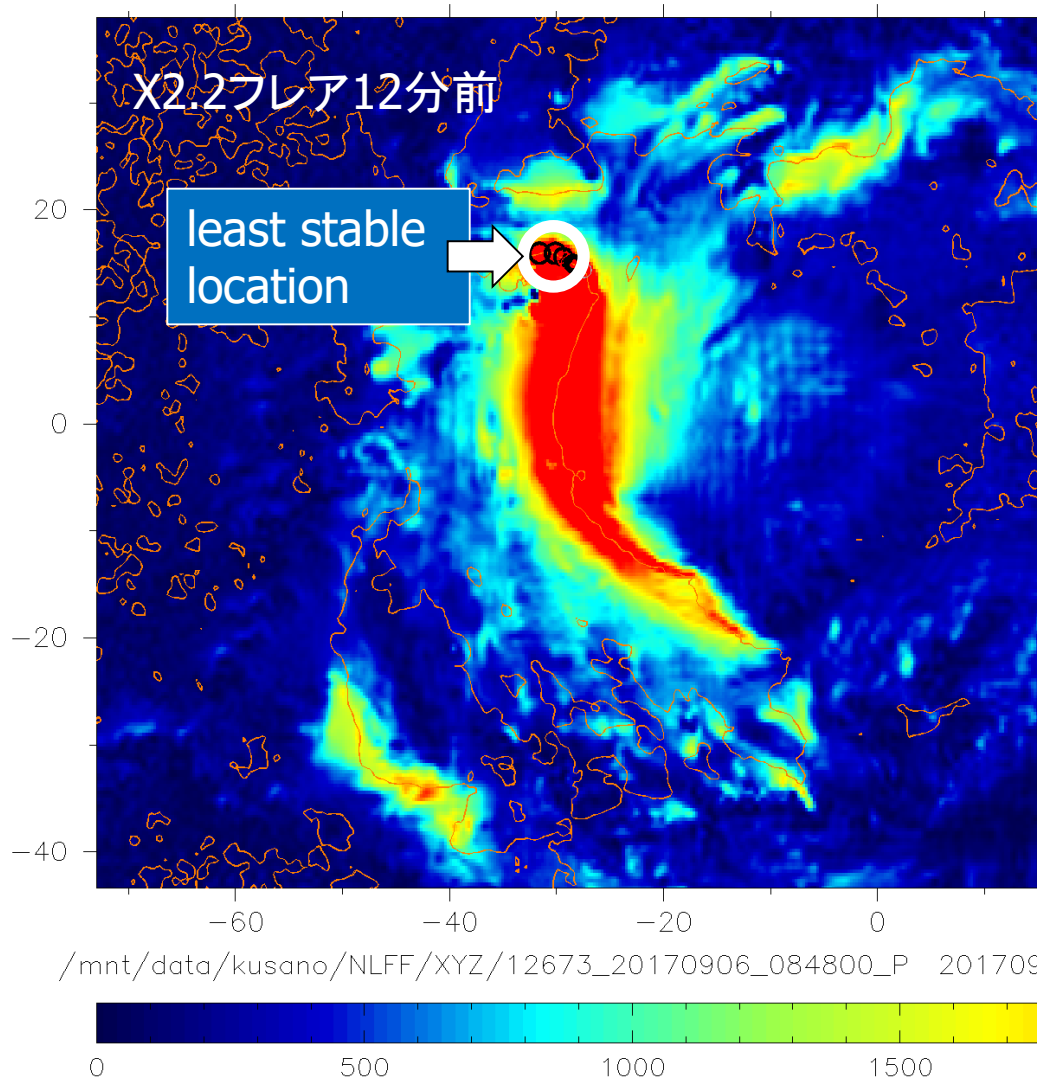


2017_09_06 11:48 UT (X9.3フレア12分前)

活動領域12673の磁場



自由エネルギーの分布とフレア発生予測領域



まとめ

- 巨大フレアは情報化社会の基盤を脅かす潜在的风险を有しており、本プロジェクト(**PSTEP**)では、その発生と影響を事前に予測するための研究開発を全国的な共同研究として進めています。
- 本年度は、独自に見出した不安定性(**ダブル・アーク不安定性**)の臨界パラメタ(κ)による**新しいフレア予測スキーム(κ -scheme)**を開発。
- 地球シミュレータを利用して、第24太陽周期(2010~)に観測された200の大型活動領域を解析し、この周期に発生した**X2クラス以上の9フレアのうち7フレアの予測が κ -schemeで可能**であることを確認。
【世界初の物理ベース・フレア予測】
- その他
 - コロナ質量放出の地球影響を、惑星間電波シンチレーション観測とMHDシミュレーションの同化手法を用いて予測するシステムを開発中
 - 西暦774年に発生した三宅イベントにおける宇宙線生成核種の大気中拡散を再現するGCMシミュレーションを実施