

第11回宇宙天気ユーザーズフォーラム 2016年6月14日（火） 11:05-11:35

宇宙天気三二講座 －磁気圏編－

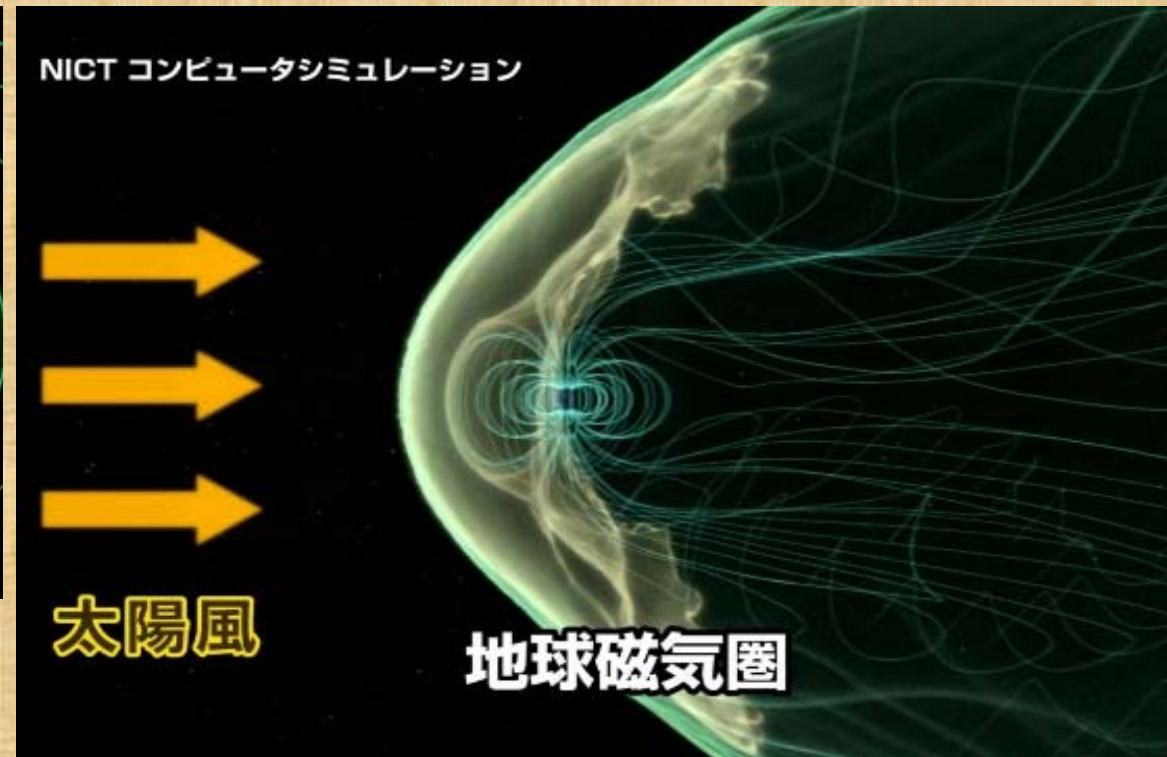
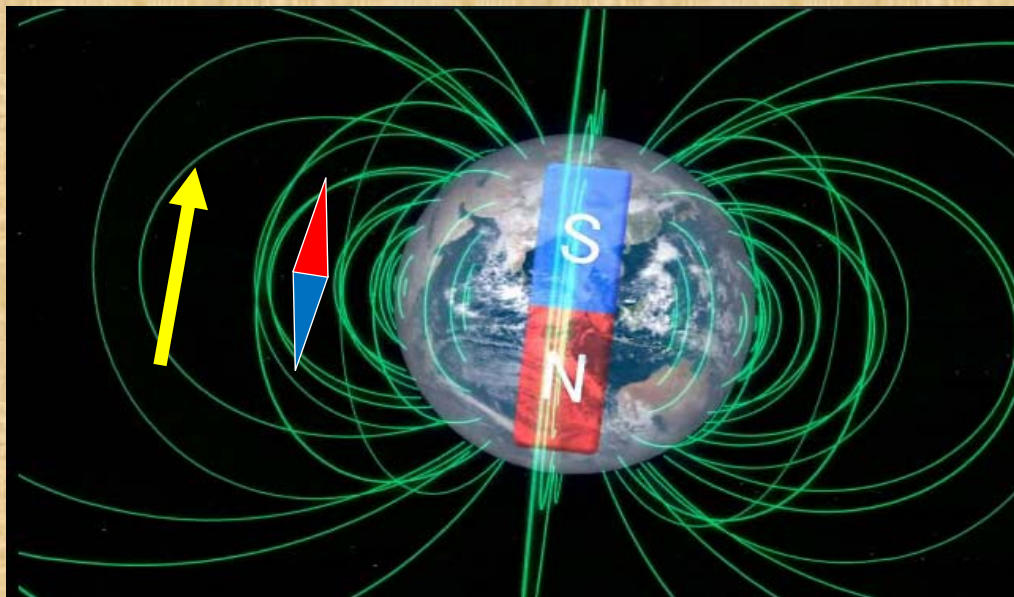
情報通信研究機構 電磁波研究所

宇宙環境研究室

長妻 努

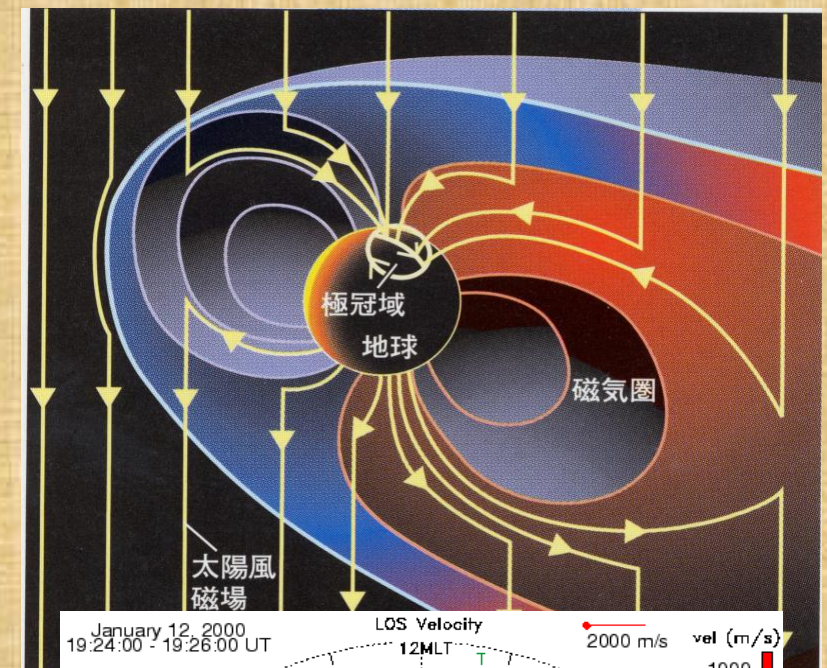
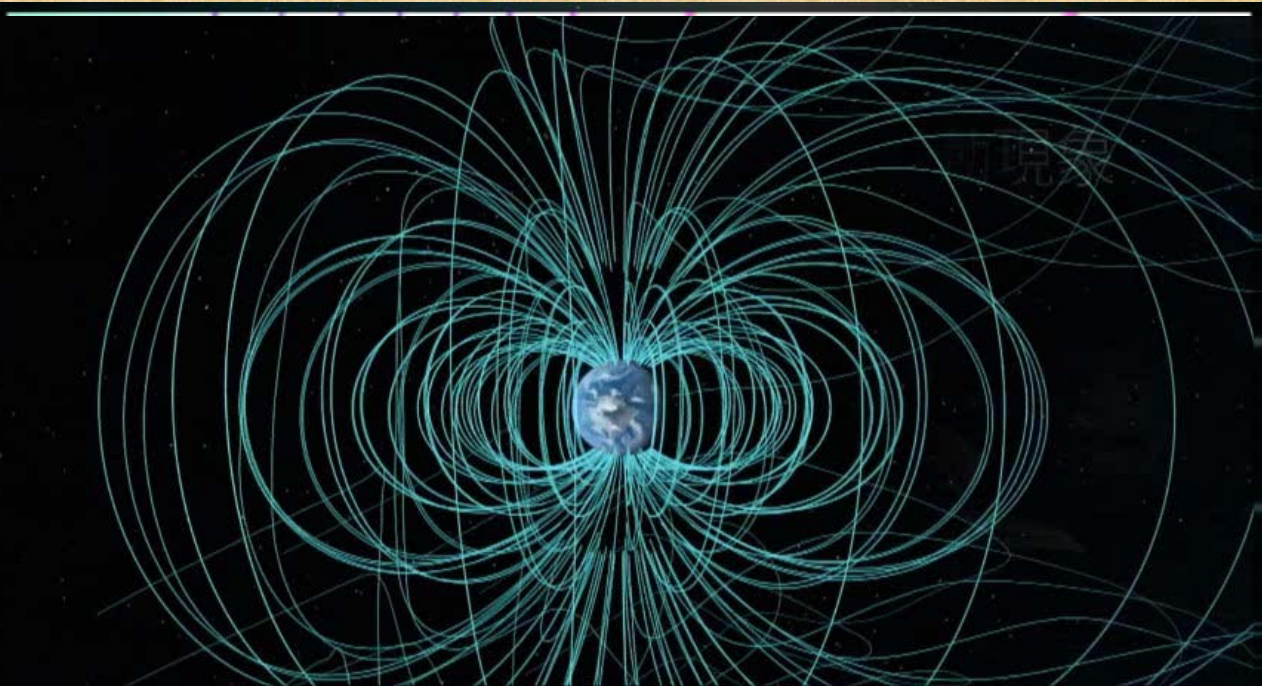
磁気圏概要

磁気圏とは？

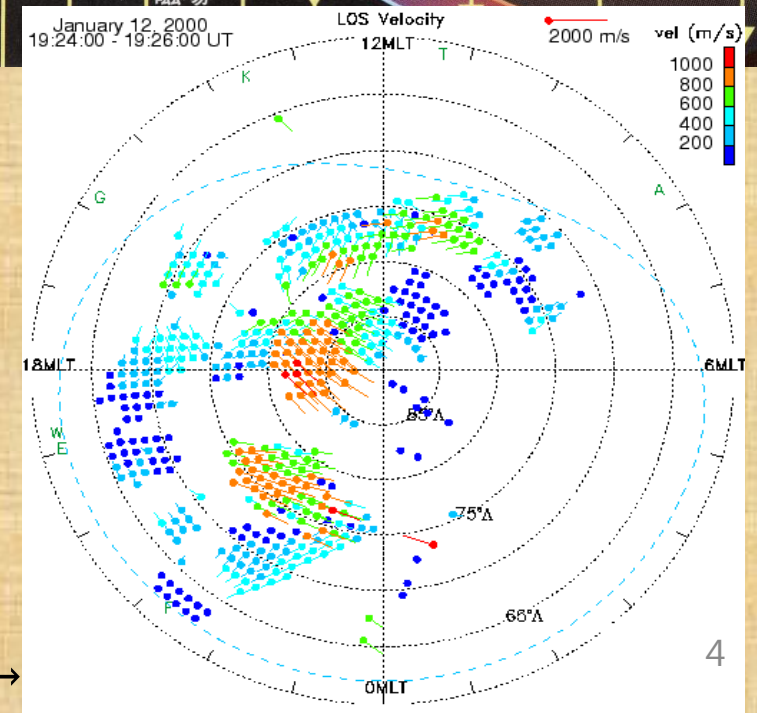


- 地球は磁場を持つ惑星の一つ(磁力線は北向き)。
- 太陽風の影響によって、磁力線が太陽と反対方向に引き伸ばされた磁気圏と呼ばれる領域を形成している。
- 地球磁気圏は高エネルギー粒子の侵入を妨げる役割も果たしている。

太陽風に駆動される磁気圏対流

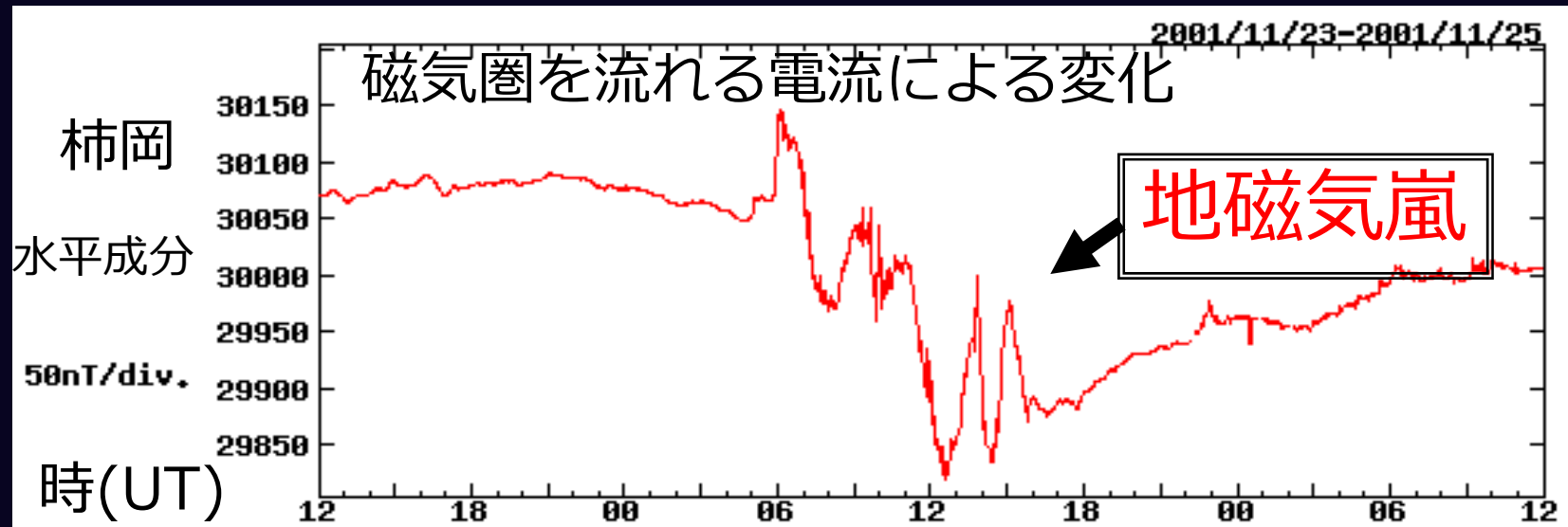
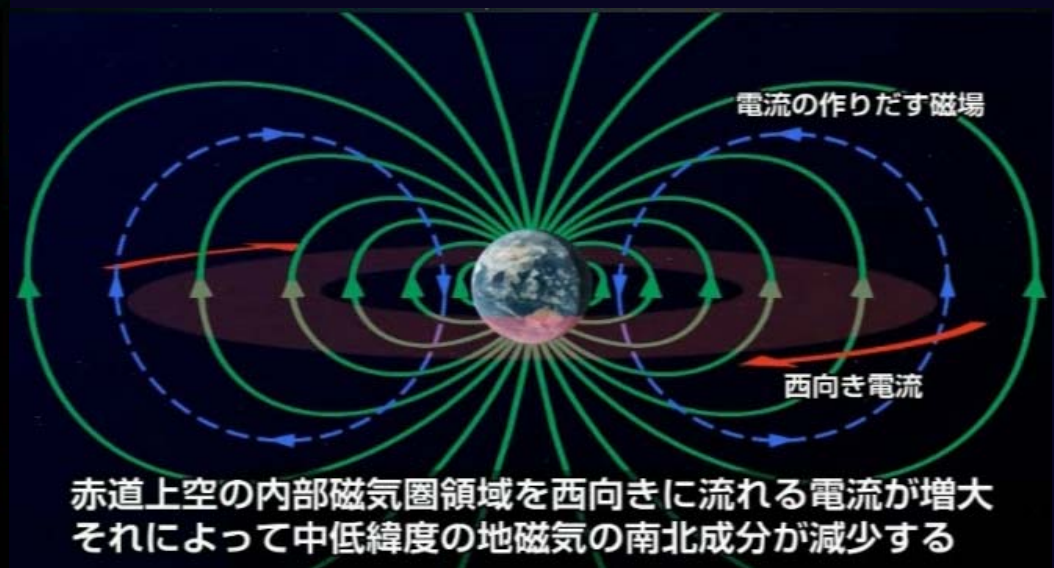
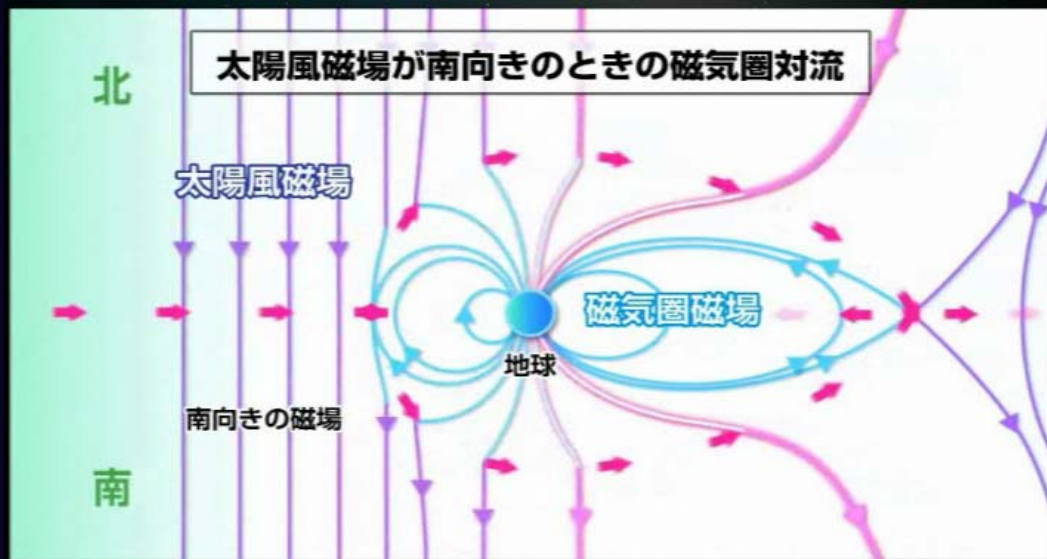


- 太陽風磁場が**南向きの時**に、磁気圏対流が発達する。
- 磁気圏対流が発達することによって、磁気圏内を流れる電流は増加し、磁気圏内の環境は大きく乱れる。



短波レーダーによる磁気圏対流の観測例→

地磁気嵐



太陽風速度が速く、強い南向きの磁場が長く続く時に生じる。

高速太陽風の源

磁気嵐の原因となる太陽面現象

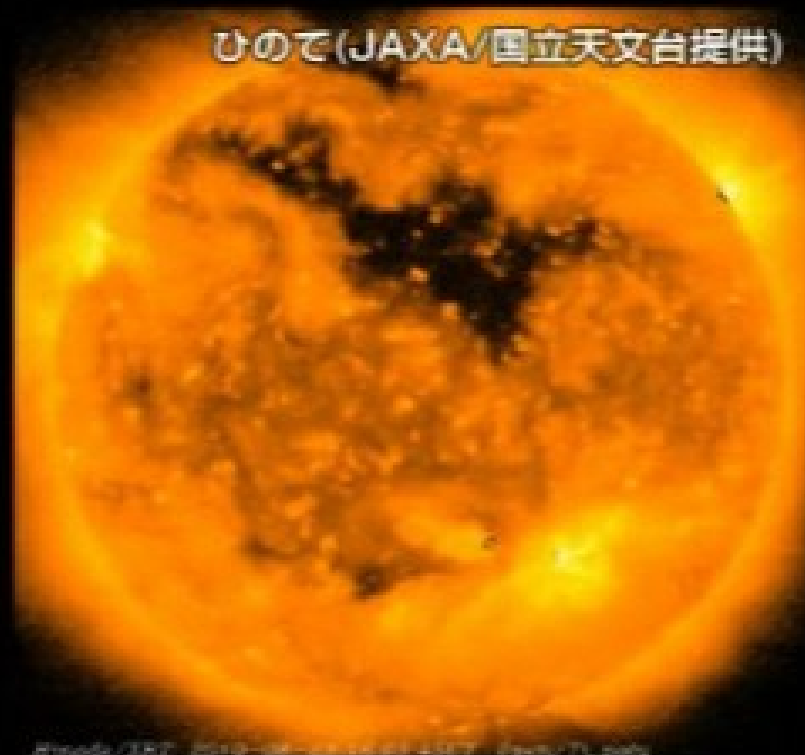
SOHO (ESA/NASA提供)



2004/11/06 15:18

CME

ひので (JAXA/国立天文台提供)



Hinode/ERT 2019-08-01 14:57:45 UT 4000 Å TL pass

コロナホール

高速の太陽風が地球にやってくると、宇宙環境を乱すことがある⁶。

オーロラと地磁気



電子の降り込み

電流

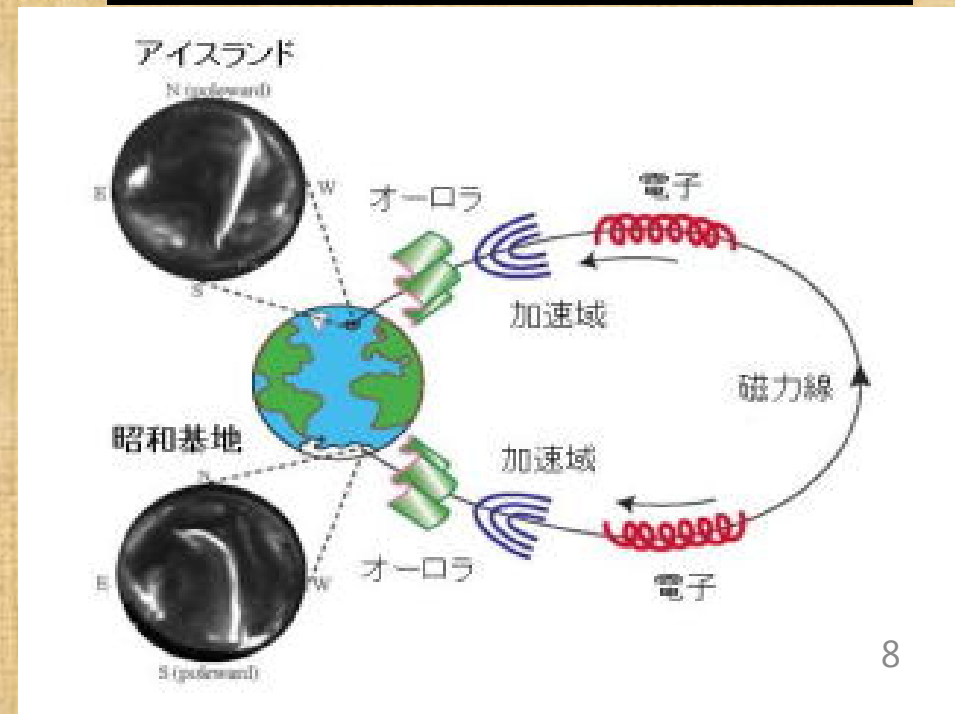
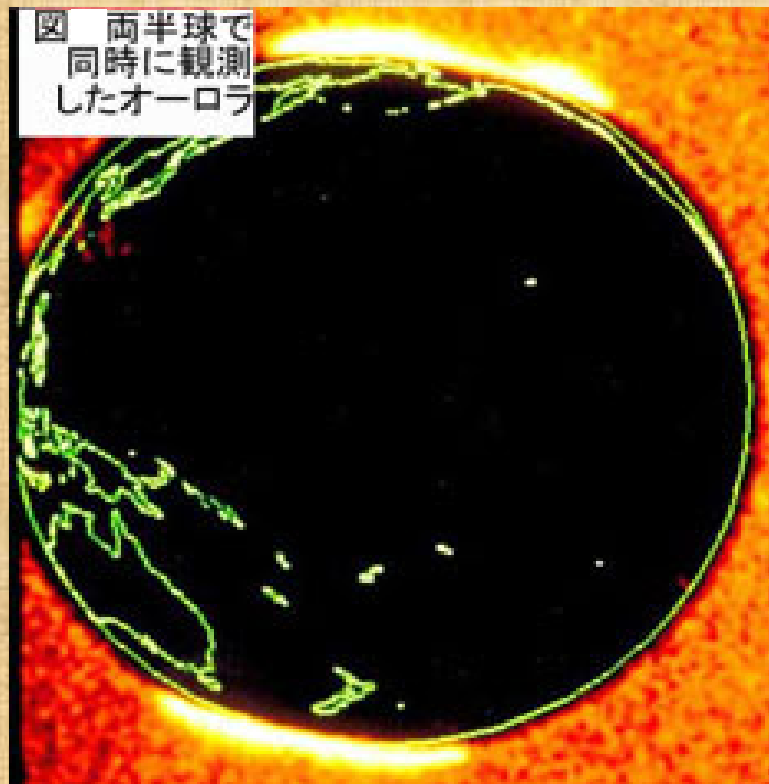
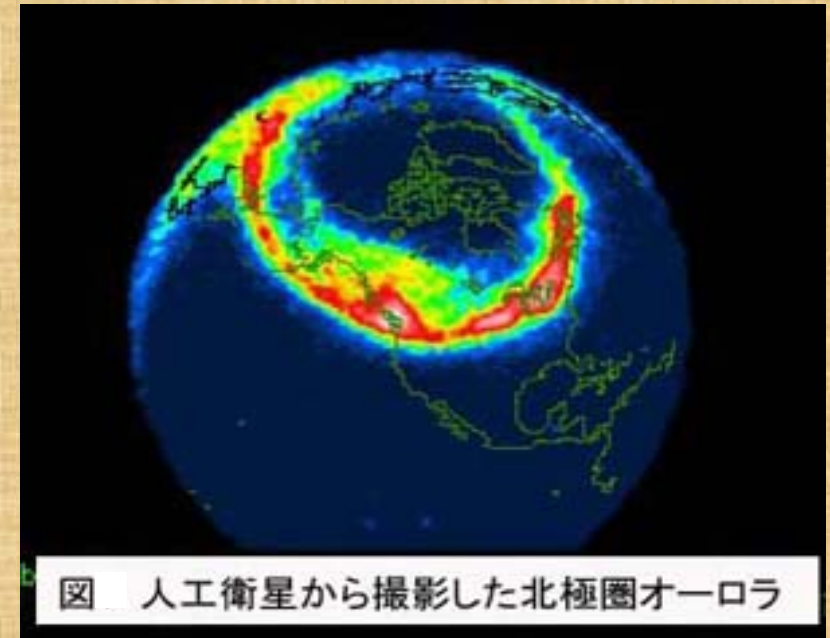


磁場変動

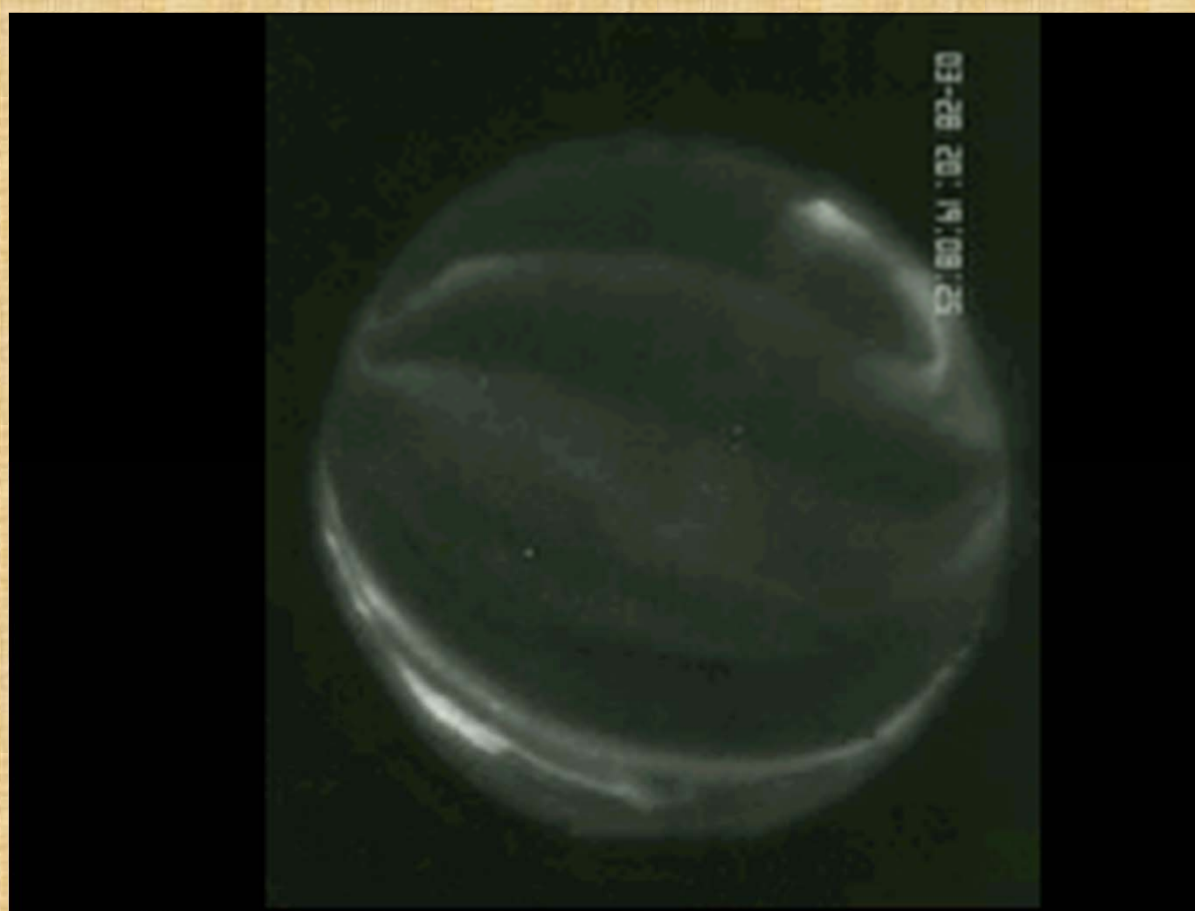
- オーロラは放電現象の一種。
- 磁気圏からの電流がオーロラを光らせる。
- 極域電離圏を流れる電流が地磁気変動を作り出す。

オーロラ・オーバル

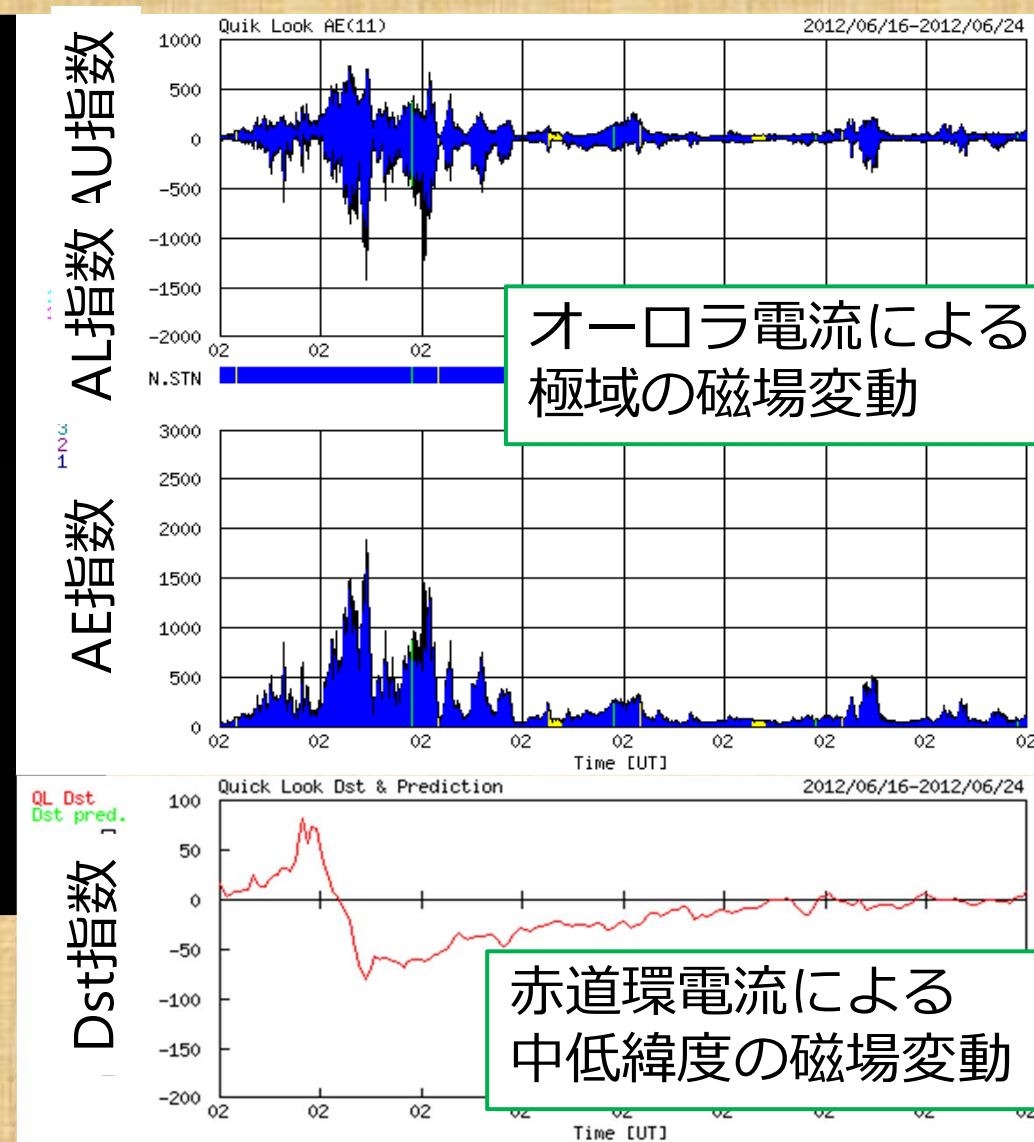
オーロラは地球全体では極を取り巻くリング状（オーロラ・オーバル）に光っており、南北で同時に観測される。



オーロラ嵐(サブストーム)

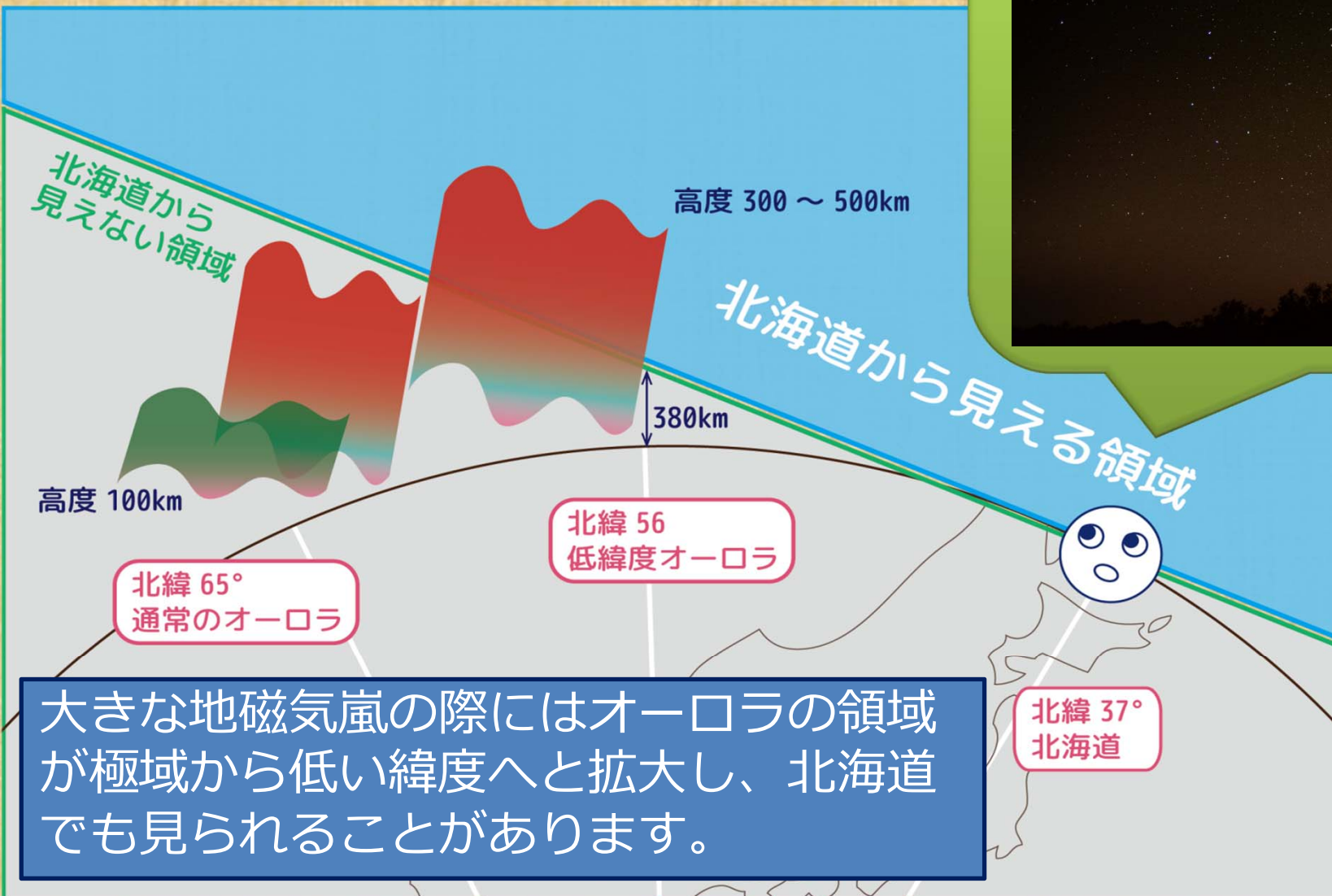


南極昭和基地の地上全天カメラで観測されたオーロラ嵐（動画60倍速）



オーロラが、爆発的に輝き全天を埋め尽くすように光る現象をオーロラ嵐(サブストーム)と呼ぶ。オーロラの源となる粒子の増加によって、衛星障害が引き起こされることがある。

地磁気嵐と低緯度オーロラ

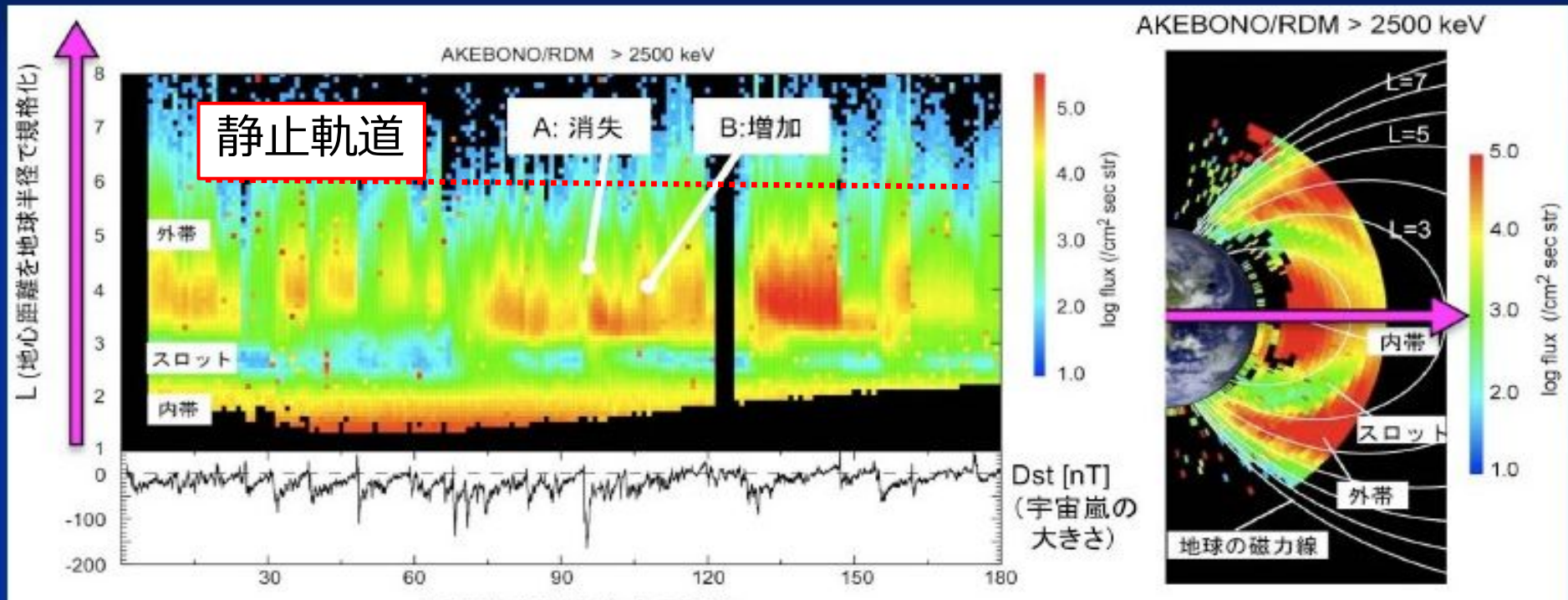


2015年の3月、6月と相次いで大きな地磁気嵐が発生し、北海道の名寄や稚内で赤いオーロラが撮影されました。

大きな地磁気嵐の際にはオーロラの領域が極域から低い緯度へと拡大し、北海道でも見られることがあります。

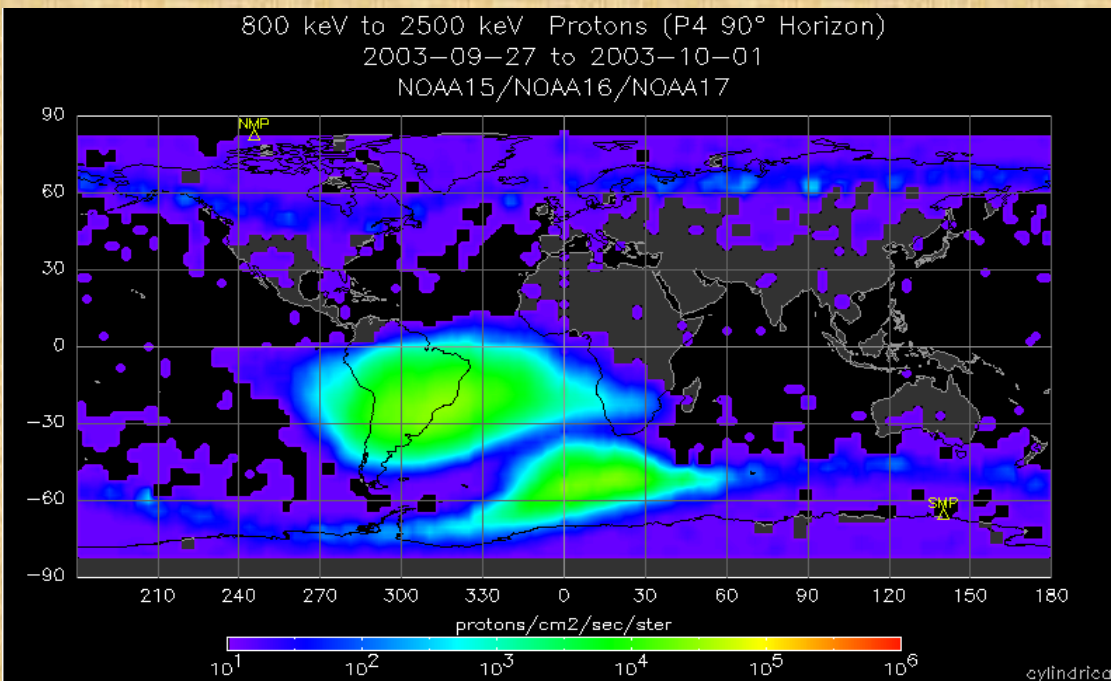
放射線帯とその変化

「あけぼの」衛星の観測結果 — 2.5 MeV電子

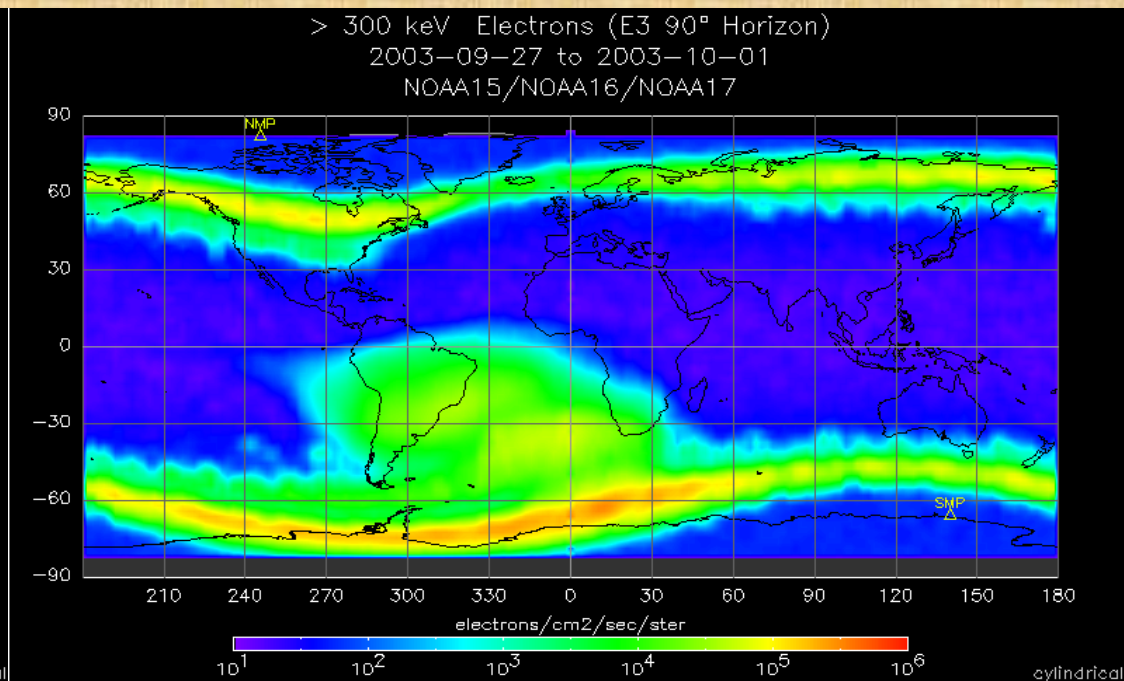


- 磁気圏内に、高エネルギー粒子が捉えられている領域があり、放射線帯と呼ばれている。内帯と外帯がある。
- 磁気嵐に伴い、放射線帯は激しく変化する。
- 放射線帯の電子が増加することで、人工衛星が故障する危険度が高くなる。

低高度(850km)の放射線帯分布

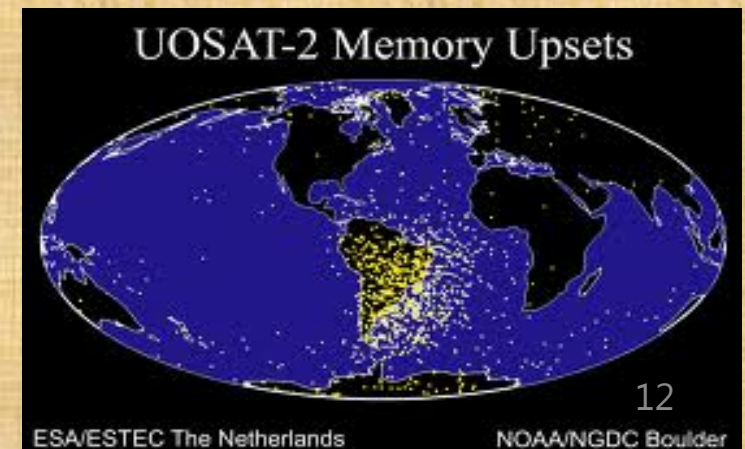


陽子：800-2500keV



電子：300keV以上

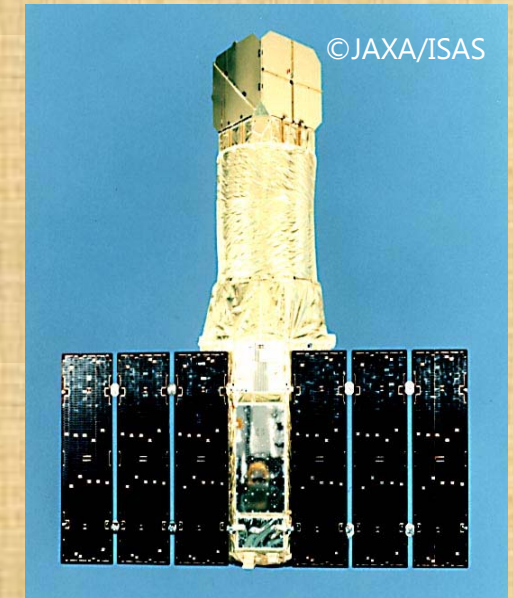
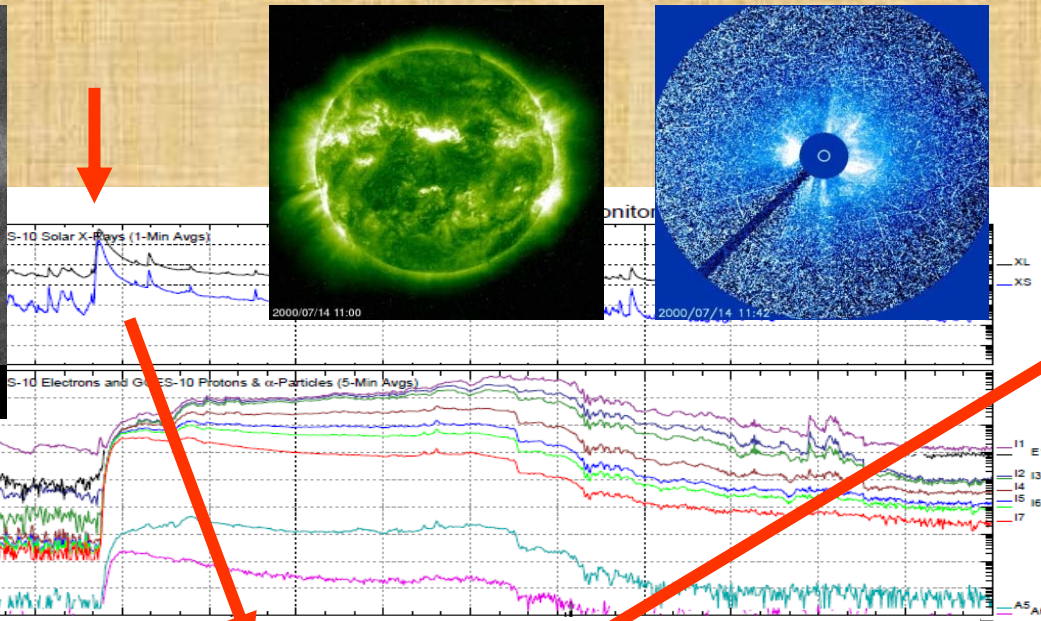
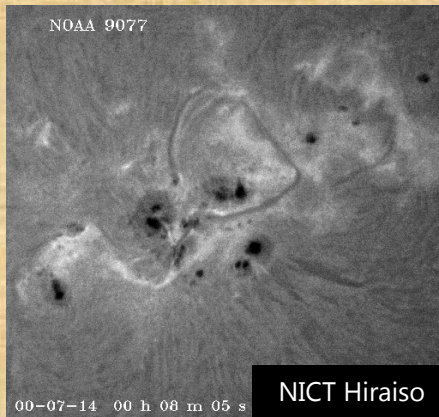
- 南大西洋～ブラジル上空にフラックスの大きな領域がある
→South Atlantic Anomaly (SAA)
- CPUの誤動作 (Single Event Upset) の要因。



宇宙天気の影響

2000年 あすか衛星障害（制御不能）

2000年7月に強い地磁気嵐によって地球大気が膨張し、大気摩擦によりあすか衛星の姿勢制御ができなくなった。その結果、観測を継続できなくなり、2001年3月に衛星運用を終了した。



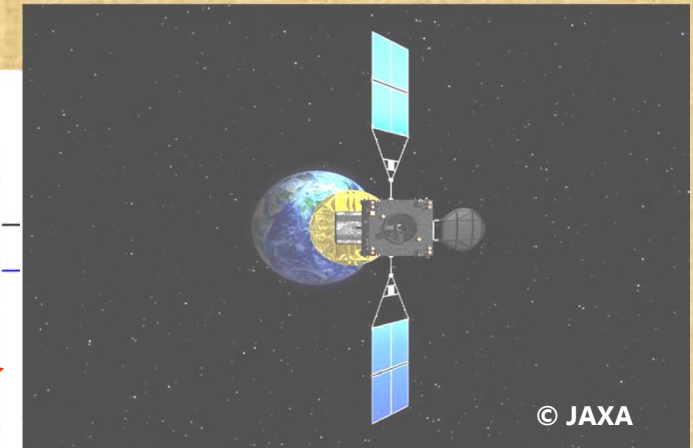
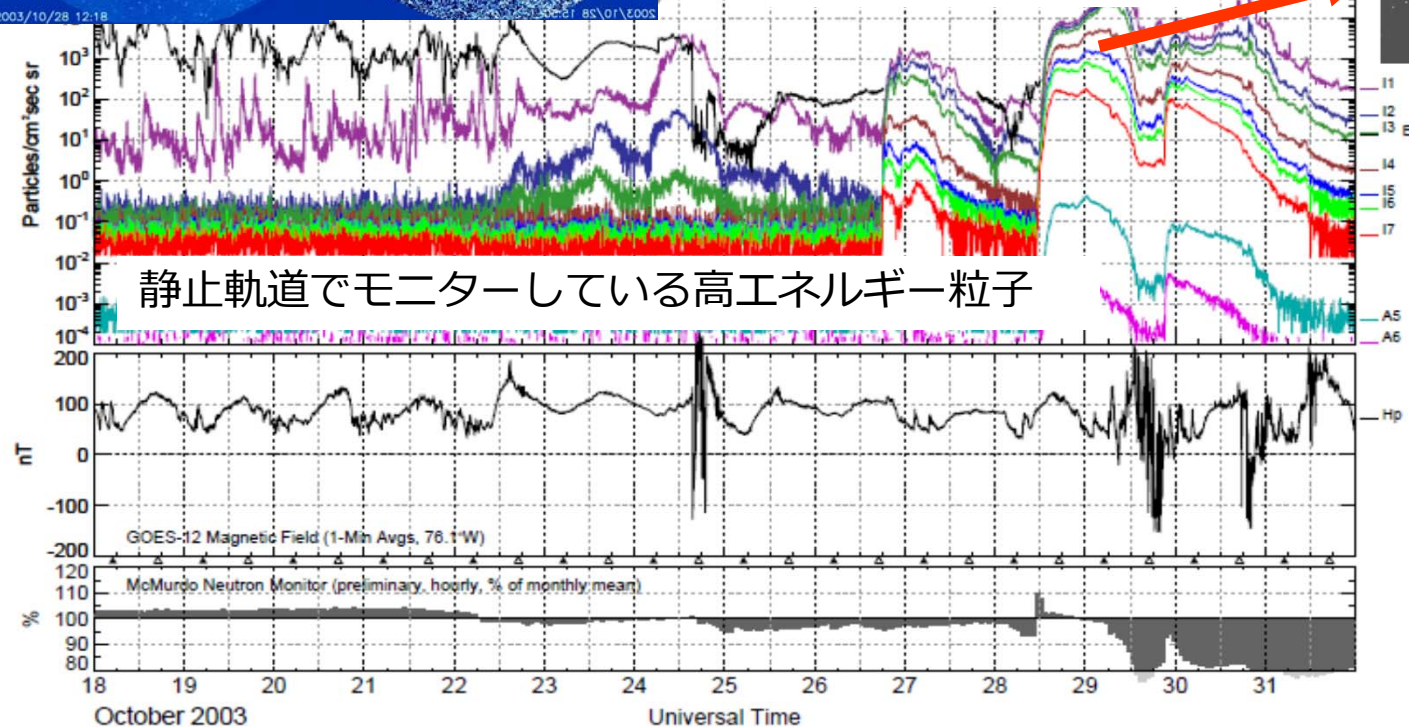
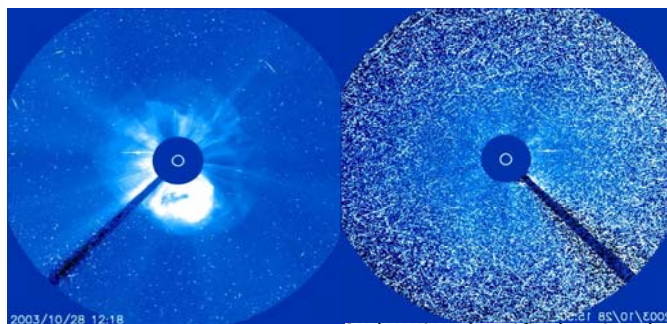
X線天文衛星あすか

朝日新聞 2001.1.27

2001.1.27 朝日新聞
「あすか」結局落下へ
 太陽活動の影響で昨年夏から観測不能になっていた文部科学省宇宙科学研究所（宇宙研）のX線天文衛星「あすか」が回復せず、二月末から三月初めの間に落下することが、二十六日明らかになった。次世代の衛星を積んだM5ロケットの打ち上げも昨年二月に失敗しており、次の打ち上げまで約四年間、日本の「お家芸」であるX線天文学に空白が生じることになる。

2003年 高エネルギー粒子による DRTS衛星センサーの乱れ

平常時の太陽可視光観測（左）と
障害発生時の太陽観測（右）



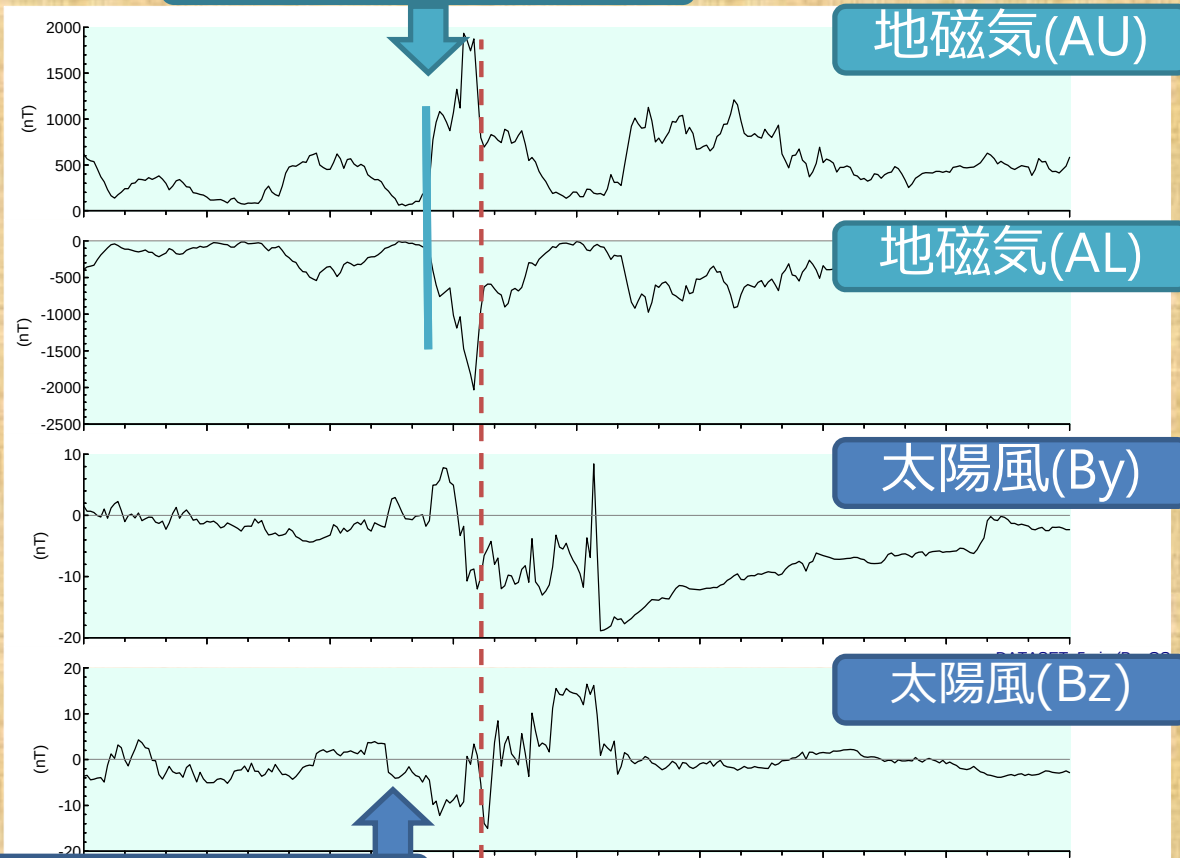
データリレー試験衛星DRTS
（こだま）が高エネルギー
粒子によりセーフモードに
切り替わった。

◆太陽フレアで衛星「こだま」に異常 宇宙航空研究開発機構のデータ中継技術衛星「こだま」で、日本時間の29日午前0時30分ごろ、姿勢制御装置に異常が発生した。28日午後6時51分に起きた太陽表面の大規模な爆発「太陽フレア」により放出された高エネルギー粒子（放射線）が衛星に衝突、衛星が地上との通信を自動的に停止した状態になっている。通信総合研究所によると、今回の太陽フレアは過去30年間で最大級の放射線量を放出している。

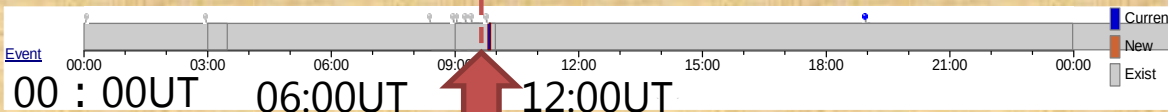
2010年 米国通信衛星Galaxy15障害

IMF南転約50分後

粒子増大



太陽風Bz南転

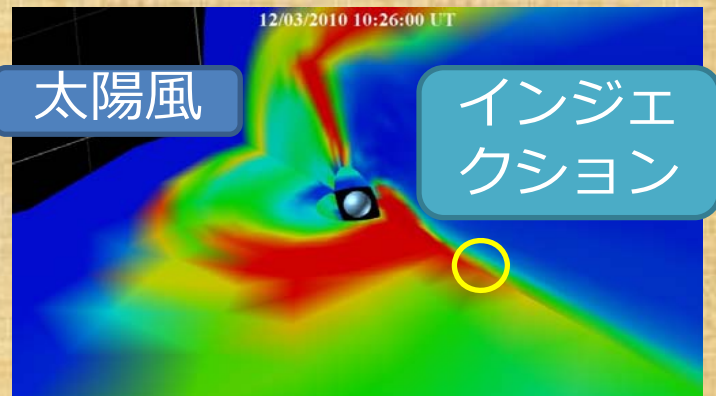
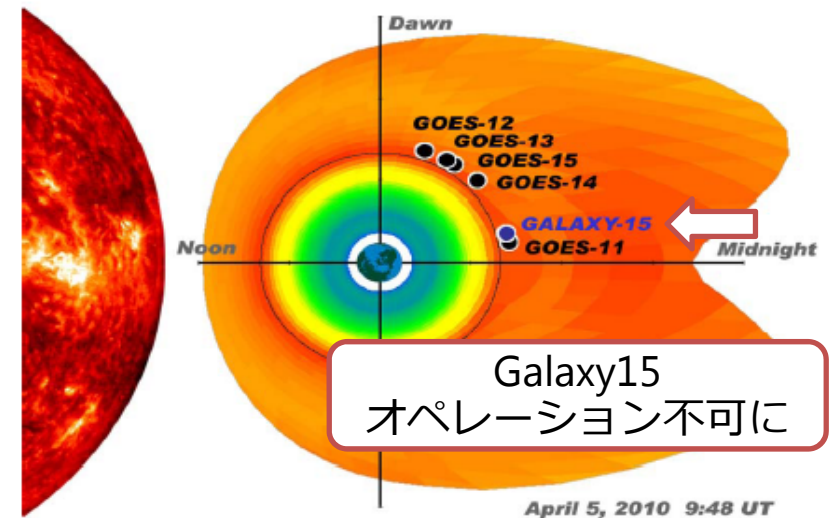


Galaxy15障害発生

粒子増大 約90分後

Galaxy 15 (133 W) Anomaly 09:48 UT

Satellite Locations

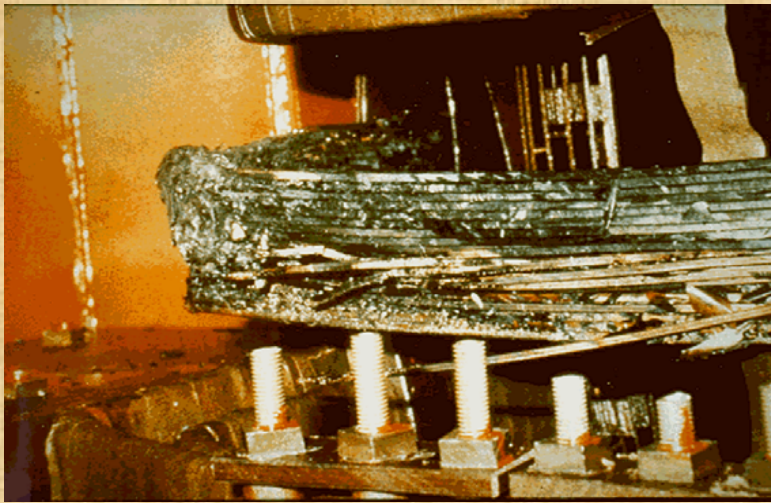


NICTのGlobal MHDシミュレーションで再現されたオーロラ嵐に伴う粒子増大

地磁気誘導電流（GIC）による障害

－過去に発生した主な事例－

- 1989年3月13-14日 – カナダ・ケベックで停電。変圧器のダメージ（約9時間）。600万人に影響し、復興に数カ月を要した。
- 2003年10月30日 – スウェーデン・マルメで停電（約5万人に影響）、南アフリカの変圧器に障害。



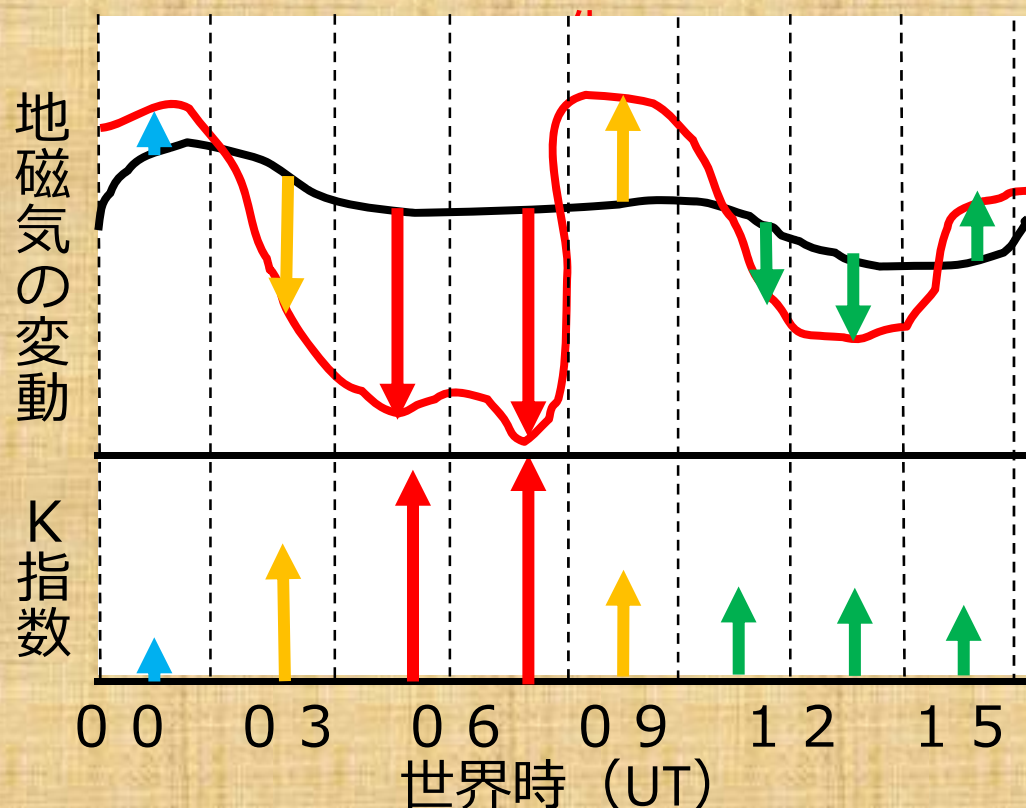
←誘導電流によってダメージを受けた変圧器

インシデントは高緯度地域が多いが、中・低緯度でも発生しうる。日本でも、宇宙環境によって送電線に誘導電流が流れる現象は観測されているが、大事には至ってはいない。

情報サービス

地磁気活動の指標－K指数－

静穏時の日変化 じょう乱時の日変化



日報・週報等で用いている地磁気活動の表現とK指数の対応関係

日報等での表現	一日の最大K指数
静穏	$K \leq 3$
やや活発	$K = 4$
活発	$K = 5$
非常に活発	$K \geq 6$

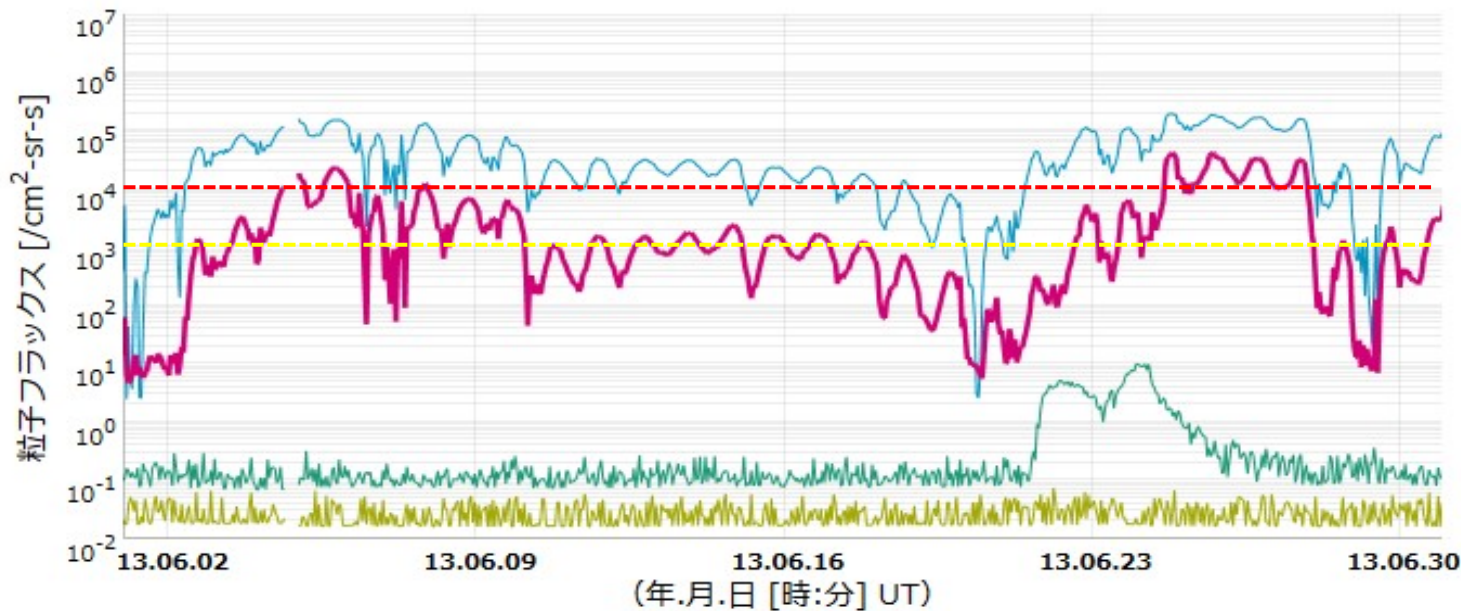
K指数：地磁気の乱れ（じょう乱）の大きさを対数的に数値化したもの。値は0～9。世界時（UT）で3時間毎に導出（1日8個）。

日本における地磁気活動の現況把握には、気象庁地磁気観測所（柿岡）のデータ及びK指数を標準的に利用。

静止軌道

放射線帯電子フラックスのレベル

▼ 静止軌道粒子データ(GOES衛星/Secondary)



2013/06/10 17:00 UT

放射線帯電子

● >0.8 MeV 27500

● >2.0 MeV 900

高エネルギープロトン

● >10 MeV 0.177

● >100 MeV 0.0167

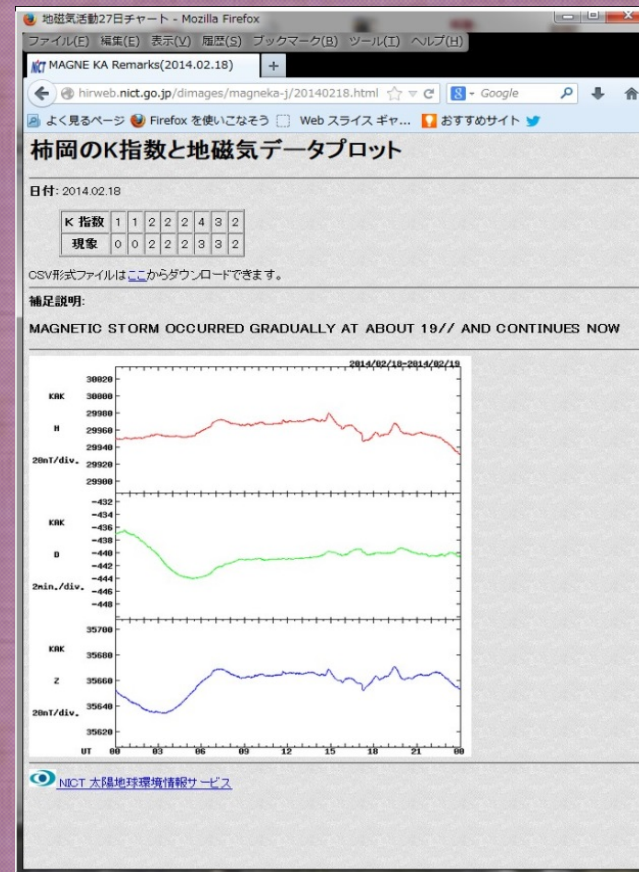
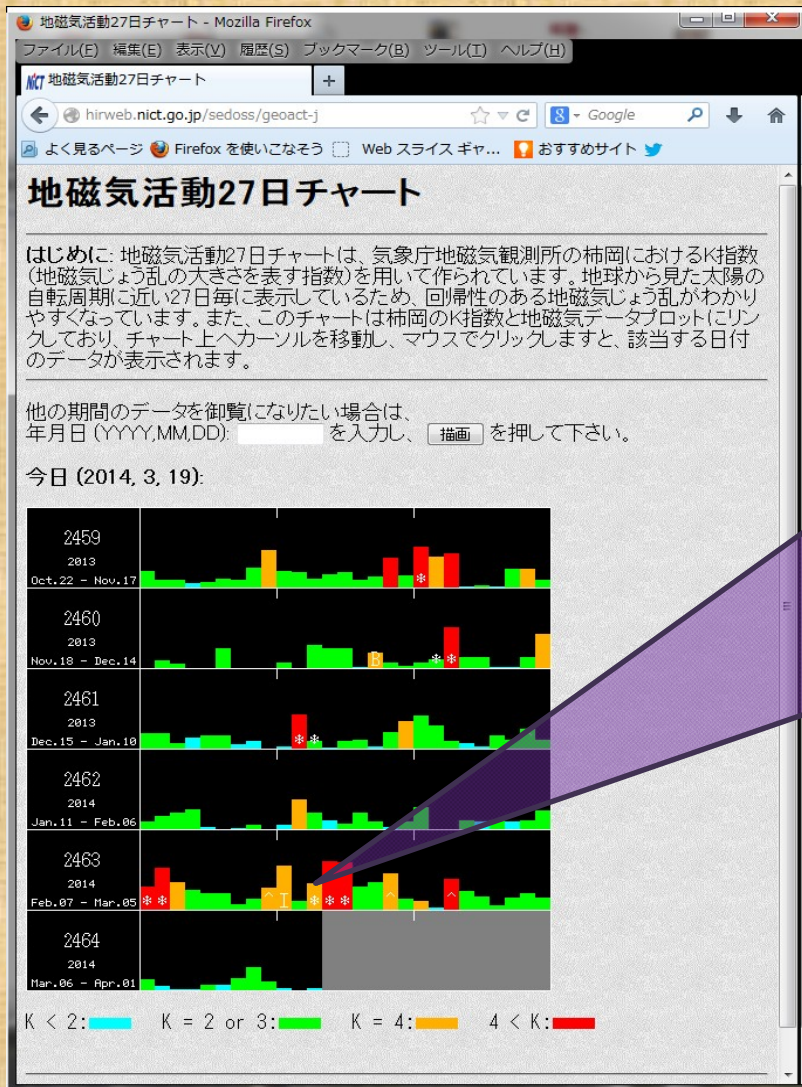
GOES衛星/Secondaryが静止軌道で観測した放射線帯電子と高エネルギープロトンのリアルタイムデータです。詳しくはこちら。

静穏 : 1000 [$/\text{cm}^2 \text{ sr s}$]未満
やや高め : 1000 [$/\text{cm}^2 \text{ sr s}$]以上
10000 [$/\text{cm}^2 \text{ sr s}$]未満
高め : 10000 [$/\text{cm}^2 \text{ sr s}$]以上

現在は、2MeV以上の高エネルギー電子のフラックスを基準にレベルを決定。

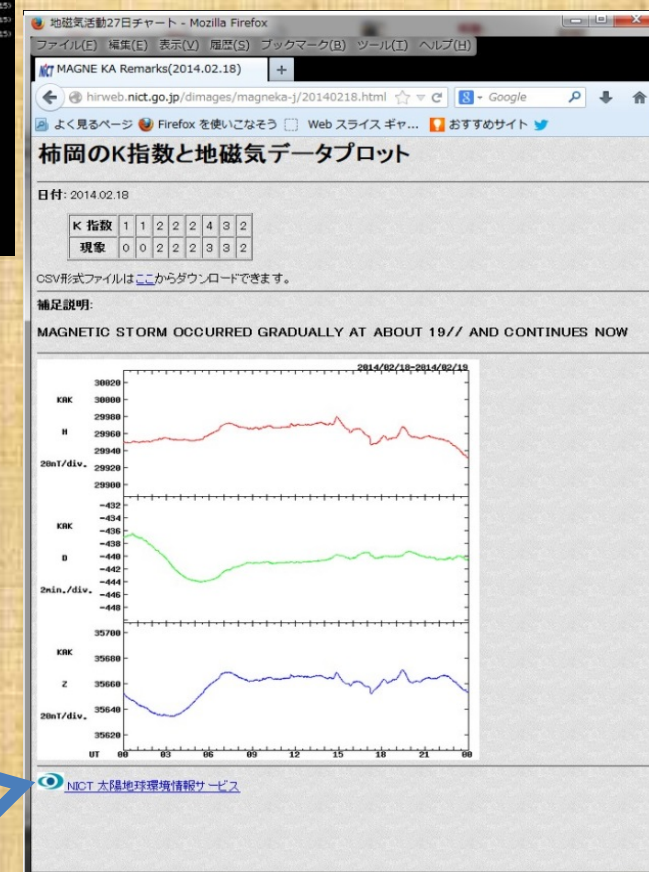
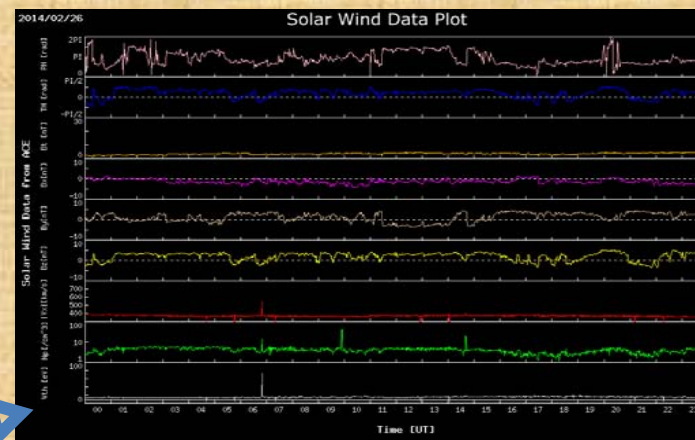
地磁気活動27日チャート

<http://kogma.nict.go.jp/cgi-bin/geomag-interface-j>



地磁気活動が、太陽の自転周期である27日の周期性を示すことを元に作成したチャート。地磁気活動の中期変動の目安として有用。

<http://hirweb.nict.go.jp/sedoss/solact3-j>



活動領域の成長・衰退・X線フレア・太陽風・高エネルギー粒子（プロトン、電子）・地磁気活動を、太陽の自転周期である27日の周期性を示すことを元に作成したチャート。宇宙天気の前兆現象の関係を理解する上で有用。

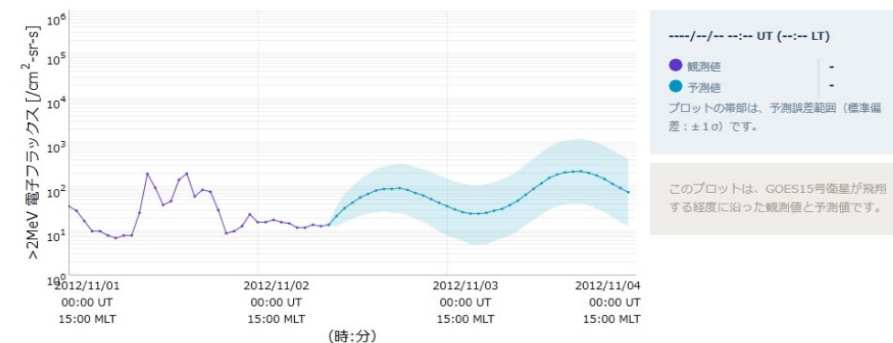
放射線帯電子フラックス予報

<http://seg-web.nict.go.jp/radi/>



きのう、きょう、あすの3日間の電子フラックスの予測値と観測値

毎時10分に更新 / 前回の更新:
2012/11/02 19:10 (JST)



静止軌道の電子フラックスの現況、及び1日～3日先の予測情報を提供。観測BOXでは、電子フラックスのデータに加え、太陽風や地磁気活動との比較ができる。

静止地球環境観測衛星「ひまわり8号・9号」 宇宙環境データ取得装置 (SEDA)



陽子センサー
(計8個)

電子センサー



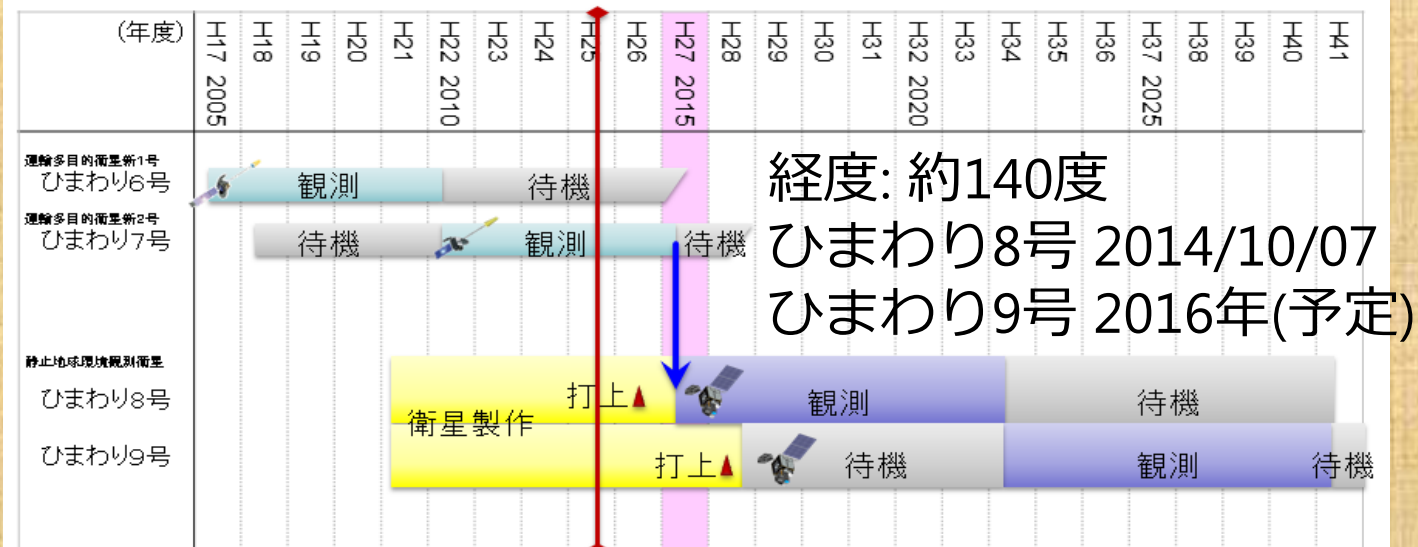
**Space Environment
Data Acquisition Monitor (SEDA)**

陽子センサー : 15-100 MeV (8ch.)

電子センサー : 0.2-5 MeV (8ch.)

時間分解能 : 10秒

＜ひまわりシリーズ運用スケジュール＞

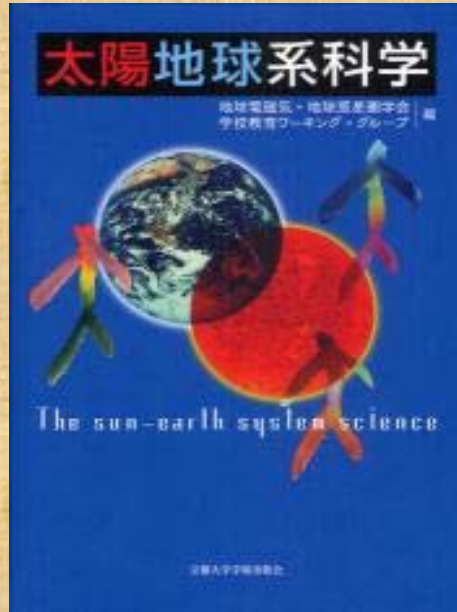


- 気象庁からNICTへ準リアルタイムのSEDAデータを提供。現在、同データを宇宙天気の実況把握に活用しており、予測モデルの入力としても活用の予定。
- 計測開始は2014年11月3日から。現在計測データの品質を確認し、データベース公開を準備中。

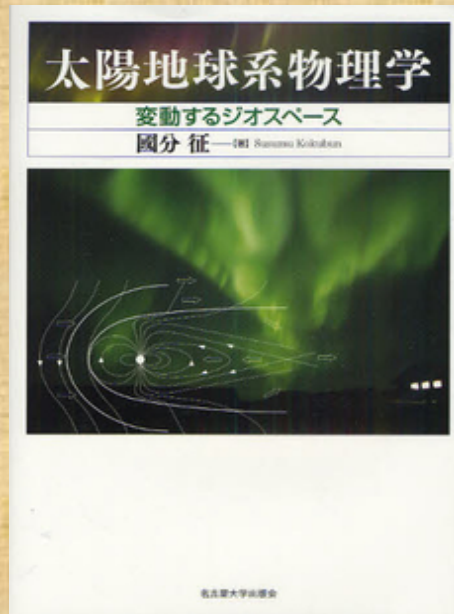
参考URL

- SWC宇宙天気情報センター
 - <http://swc.nict.go.jp/>
- 太陽地球環境情報サービス
 - <http://hirweb.nict.go.jp/index.html>
- 宇宙天気豆知識
 - <http://seg-web.nict.go.jp/e-sw/movie/sw-knowledge.html>

参考図書

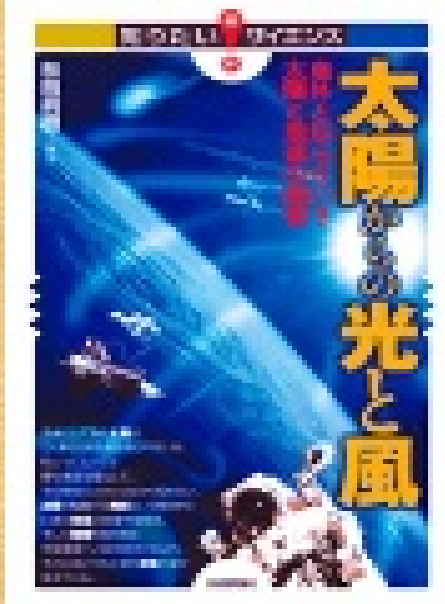


- 「太陽地球系科学」、地球電磁気・地球惑星圏学会学校教育ワーキンググループ・編、京都大学学術出版会、3570円



- 「太陽地球系物理学 変動するジオスペース」、国分征一・著、名古屋大学出版会、6510円

参考図書



(読み物風):「太陽からの光と風～意外と知らない？太陽と地球の関係」, 秋岡眞樹編・著, 技術評論社, 1659円



(専門向け教科書):「総説 宇宙天気」, 柴田一成, 上出洋介編・著, 京都大学学術出版会, 6300円