

宇宙天気に関する日本及び国際的な状況について

磯部洋明

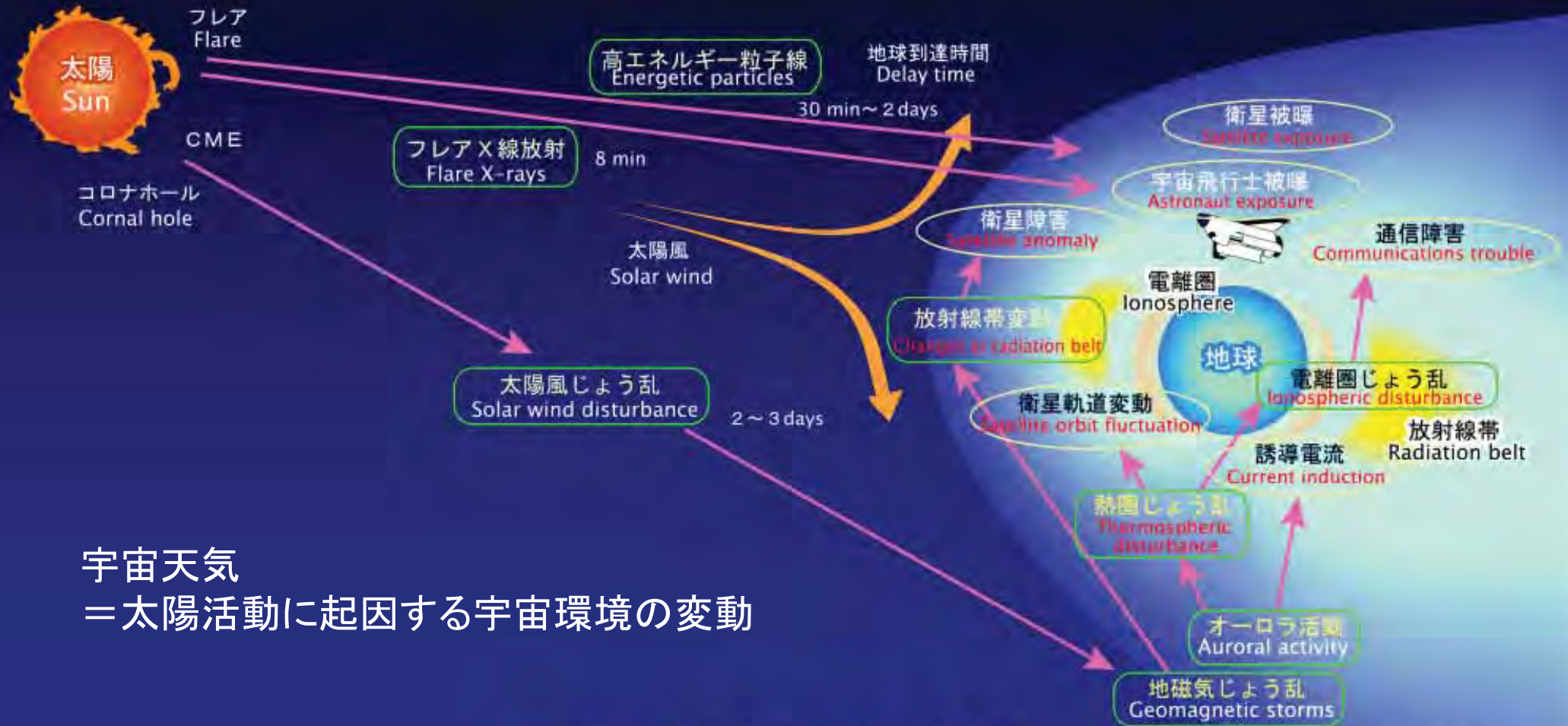
第10回宇宙政策委員会調査分析部会

2014年2月25日

サマリ

- 宇宙天気現象は日本の宇宙利用と国民生活にとって様々な障害の原因となる。高精度測位など宇宙利用の拡大と共に宇宙天気に対する脆弱性は今後も増大する。
- 国際協力によるデータと情報の共有が世界的な流れ。
- 宇宙天気は日本が学术界を中心に衛星観測、地上観測、数値モデルの全ての面で強みを有している分野であり、国際協力の中でリーダーシップを発揮できる分野である。
- 現状の観測は衛星、地上観測共に学術研究目的の装置に相当依存しているため、継続性とデータ公開体制が課題。
- 発展途上国・宇宙新興国は、自国に設置された地上観測装置等を用いた宇宙科学・宇宙開発の手始めとしての宇宙天気と、それを通じた国際協力によるキャパシティビルディングに興味を持っている。日本でも大学や研究機関が地上観測装置を展開しており、宇宙外交に活用できる可能性がある。

宇宙天気



宇宙天気
= 太陽活動に起因する宇宙環境の変動

Space weather: cause and effect
宇宙環境擾乱の発生と障害

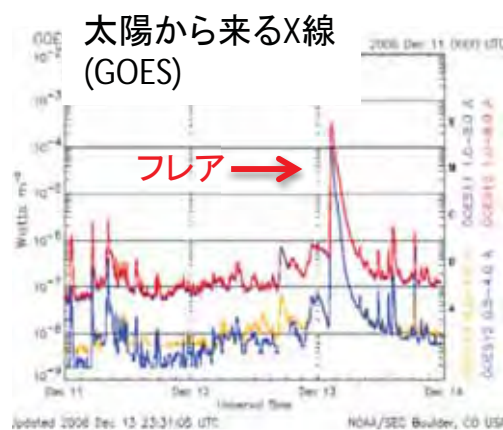
磁気圏
Magnetosphere

様々な時間スケールで変動する太陽

太陽フレア

時間スケール: 10分～数時間

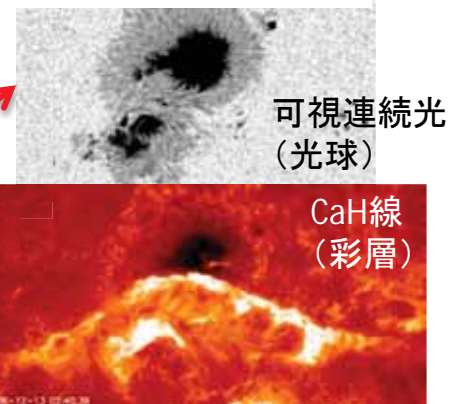
黒点の周囲に蓄積された磁気エネルギーが突発的に解放され、電波からX線まで多波長の電磁波が急激に増光する。プラズマ塊の噴出(コロナ質量放出)や高エネルギー粒子も発生。発生頻度は地震と同じベキ乗分布を示し、特に大きいもの(Xクラス)は極大期で年間10回程度。小さいものはより頻繁。



可視連続光 (京大飛騨天文台)



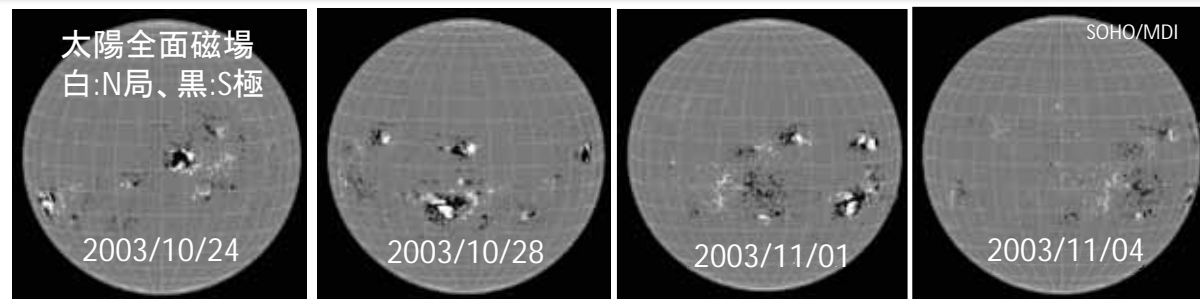
ひので可視光望遠鏡



活動領域 (= 黒点群)

時間スケール: ~1ヶ月

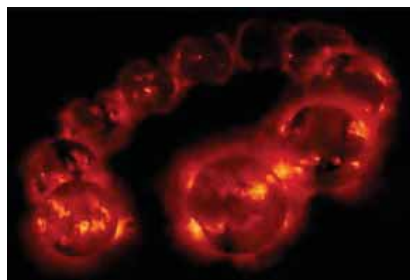
黒点の源となる磁場は太陽内部で作られ、表面に現れる。一つの黒点(群)の寿命は数週間～数ヶ月。地球から見ると太陽の自転(~27日)による変動がある。フレアを起こす活発な領域と、そうでない領域がある。



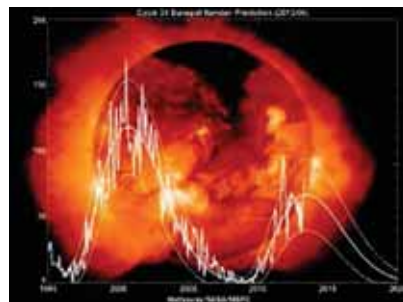
太陽活動周期

時間スケール: ~11年

黒点数は約11年の周期で増減する。メカニズムは不明。2013年は極大期。極小期には黒点はほとんど出ない。



太陽X線の10年間の変化 (ようこう)



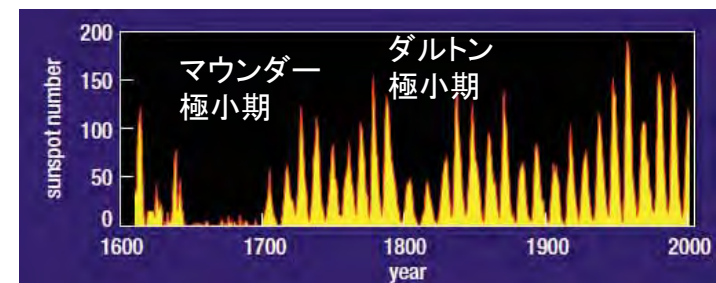
1995-2020年の黒点数の変動と予測

長期変動

時間スケール: >100年

黒点数が極端に少ない時期が数10年続く時期がある(グランド極小期)。17世紀のマウンダー極小期が小氷期だったように、太陽活動と地球気候の間に相関があることが知られている。

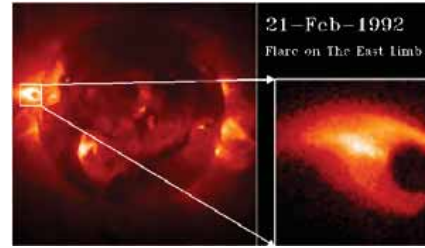
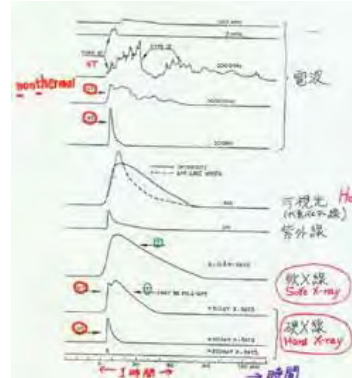
1609年以降の黒点数の変動



太陽からやってくるものと地球への影響

電磁波

- フレア発生時にX線、EUV、電波などが急激に増光
- 黒点数の11年周期に伴い、総放射量もわずかに変動する
- 光速で届く＝見えた時にはもう遅い
- **フレアの発生が予測できないと予報もできない**



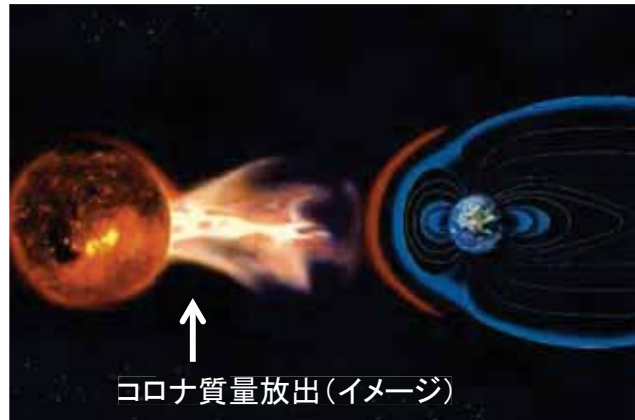
フレアの磁気リコネクション説を確立した「ようこう」のX線観測 (Tsuneta et al. 1992)

地球への影響

- 電離圏異常(通信、測位障害)
- 高層大気加熱膨張による衛星の大気抵抗増加
- 総放射量又は紫外線の長期変動は地球気候へ影響している可能性
- 超巨大フレアの場合はオゾン層の長期的破壊もありうる(高エネルギー粒子によるNOx生成も効く)

太陽風・コロナ質量放出(CME)

- 太陽風＝常時流れ出しているプラズマ
- フレア発生時には、惑星間空間にプラズマ塊が放出(コロナ質量放出;CME)
- CMEは弱いフレアでも起き、磁気嵐を起こす
- フレア発生時以外にも太陽風変動はある
- **太陽を出てから地球に届くまで1-2日かかる。太陽面・惑星間空間での観測があれば、地球への到来をある程度予報できる**



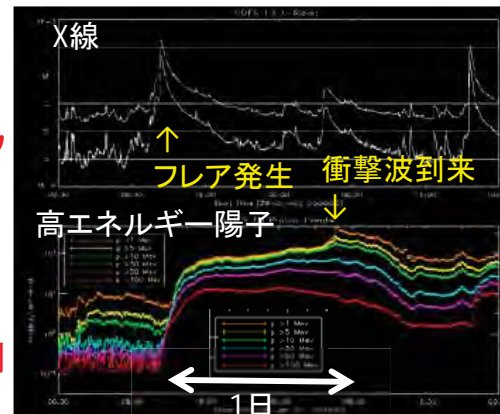
コロナ質量放出(イメージ)

地球への影響

- オーロラサブストーム
- 放射線帯粒子増加
- 地磁気嵐、地磁気誘導電流
- 電離圏異常
- これらの結果としての、衛星及び地上インフラの障害、通信、測位障害

高エネルギー粒子(SEP)

- 数10keV～数GeVの陽子、電子等
- **フレア起源のものはほぼ光速で届く。フレアの発生が予測できないと予報もできない**
- 惑星間空間衝撃波起源のものは徐々に増加し衝撃波(CME)到来時にピーク＝太陽面・惑星間空間の観測から予測できる部分もある



←GOES衛星が静止軌道で測ったX線と高エネルギー陽子

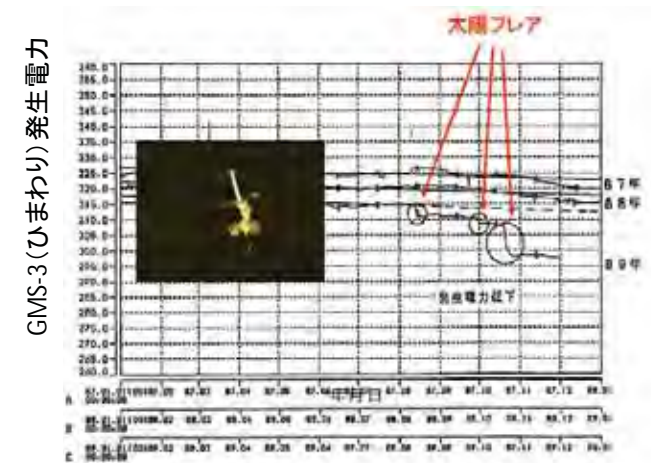
地球への影響

- 宇宙飛行士の被曝。船外活動時は特に危険
- 航空機乗務員の被曝量増加
- 衛星障害
- 電離圏異常(通信、測位)

宇宙天気現象による被害

- 2009年米NASのレポートでは、過去最大級の太陽フレアが発生した場合経済損失は2兆ドルに及ぶ。*
- 衛星障害
 - シングルイベント: 高エネルギー粒子が回路上に電荷を作り、ソフトウェアエラーが発生)
 - 深部帯電: 高エネルギー電子等の影響で衛星が帯電し、放電。衛星全損も(1973年DSCII, 1982年GOES4, 1991年MARCUS-A1997年INSAT-2Dなど)
 - デバイス、太陽電池パネルの劣化、故障(1990年ひまわり、2002年のぞみ、2003年みどり、はやぶさなど)
 - 急激な大気ドラッグによる姿勢、軌道の変化(2000年あすか)
- 宇宙飛行士被曝
 - 大フレア時は船外活動で実効20-30mSv、船内5mSv程度**
 - ISS内で遮蔽の厚い場所に退避する事例(2003年、2005年)**
 - 近年で最大の1989年のフレア程度で、静止軌道以遠の船外活動では、数1000mSvになる恐れ(五家2006)
- 航空機の運用
 - 短波通信(極航路での主要な通信手段)、GNSSを用いた運行システムの障害
 - 2003年10-11月の巨大フレアでは、WAAS(Wide Area Augmentation System、米国FAAの航空ナビゲーションシステム)が10数時間使用できなくなった。
 - フレア時は航空機内の放射線も増大
 - ICAO勧告

(蔵方、1990)

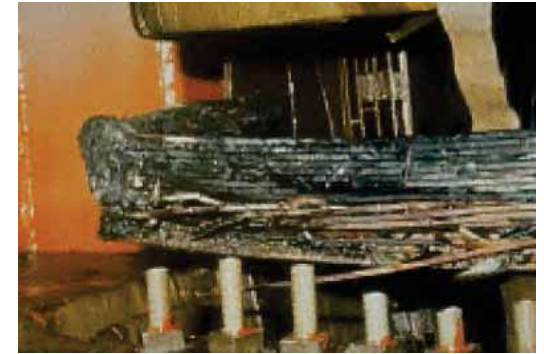


*<http://www.courierpostonline.com/article/20130606/NEWS05/306060027/Space-weather-needs-more-attention-experts-say?gcheck=1>

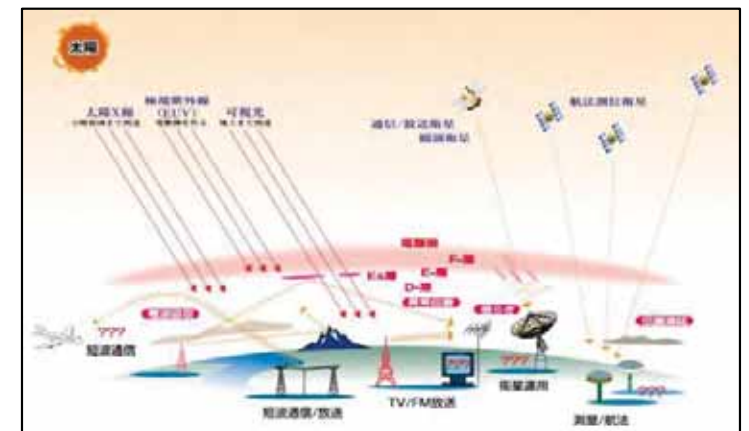
**矢部 第7回放射線安全規制検討会航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chou sa/gijyutu/004/006/shiryo/05061801/003.pdf

宇宙天気現象による被害(続き)

- 地上インフラ(主に高緯度地域)
 - 送電線、発電所への誘導電流(1989年ケベック州で大規模停電、原発の被害も)
 - パイプライン腐食
- 通信、測位の障害
 - 衛星そのものの障害に加え、電離圏擾乱による電波の異常吸収、散乱、遅延
 - 電離圏の擾乱による伝播遅延は測位の主要な誤差源
 - 極端なケースをのぞけば、現状の利用であれば、2つ周波数を使えば補正可能(補正情報を出すor受信機側で対応)
 - ロック損失してしまうような極端な現象(太陽電波バースト、プラズマバブル等)の場合は補正しても(=サービスが使えなくなる)
 - 準天頂衛星で目指すような超高精度測位のアプリケーションで電離圏擾乱がどれほど影響するかは、未検討の部分が多い。少なくとも宇宙天気の状態によってサービスが利用できなくなる場合があり得る。

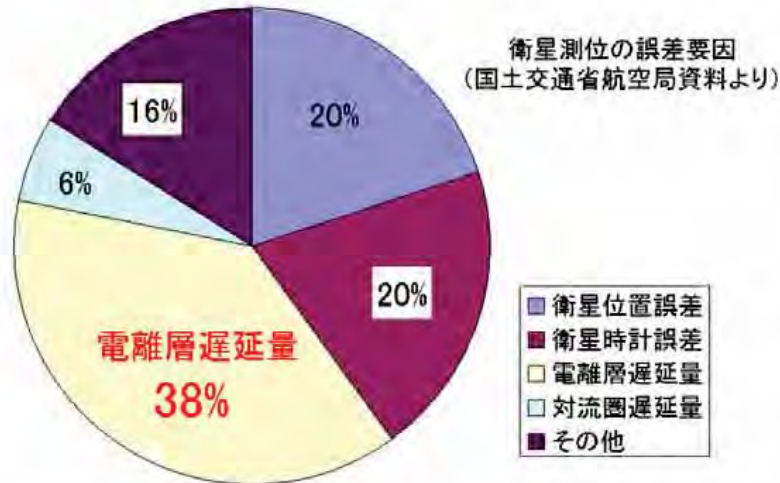


1989年のフレアで被害を受けた米NJ州の原発の変圧器

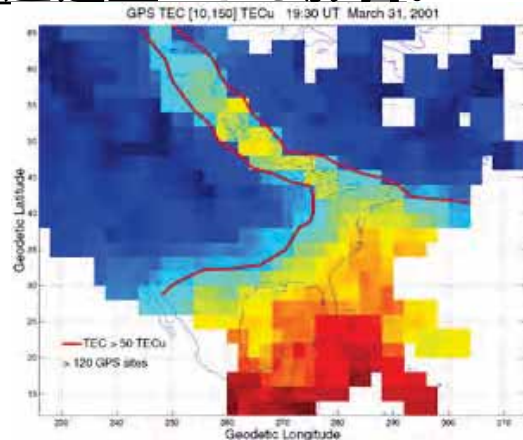


GNSSによる精密測位に対する電離圏の影響

測位誤差

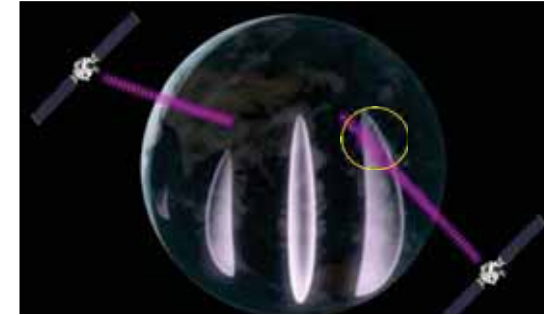


衛星測位の誤差要因のうち、約4割弱が電離層遅延量による影響。

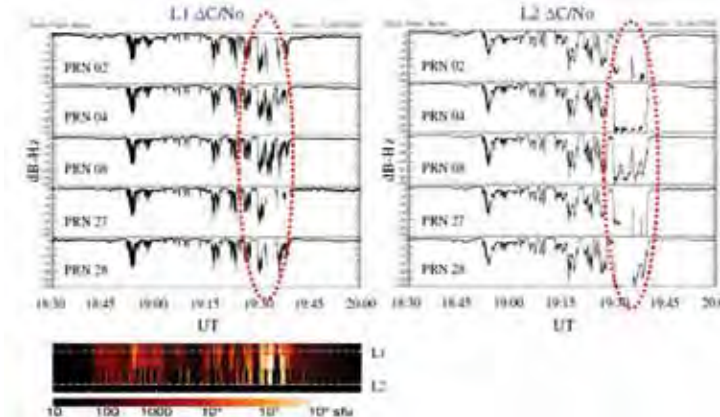


電離圏が大きく乱れ、局所的な全電子数の空間勾配が大きくなると、参照基準点による補正情報が機能しない可能性がある。

ロック損失



中・低緯度では、プラズマバブルと呼ばれる電離圏の泡(低密度領域)による電波の揺らぎで、GNSS信号が受信できなくなることがある。



太陽フレアに伴う強力な電波バーストによるGPSロック損失(2006年12月6日)。但し、このような現象は極めて稀(数十年に1回)。

国際組織の動向（宇宙天気予報関連）

UN COPUOS（国連 宇宙平和利用委員会） 長期的宇宙活動維持WG 宇宙天気専門家会合（EG C）

- ・宇宙天気予報の観点から、長期的な宇宙活動維持に必要な5つのガイドラインと2つの勧告を含む報告書を作成中。

WMO ICTSW（世界気象機関 宇宙天気国際共同チーム）

- ・ISESと協力して宇宙天気予報業務に必要な観測データの検討や、後述するICAOのConOps作成に協力。

ICAO（国際民間航空機関）

- ・ISES, WMOの協力の元、短波による通信、GNSSによる精密航法の2点に関して宇宙天気情報の航空利用の運用コンセプト（ConOps）を策定中。

COSPAR Space Weather Roadmap Study Group（宇宙空間委員会 宇宙天気ロードマップ研究グループ）

- ・宇宙天気予報業務に必要な観測データ、予測モデル、予報のニーズに関するロードマップの作成に着手。

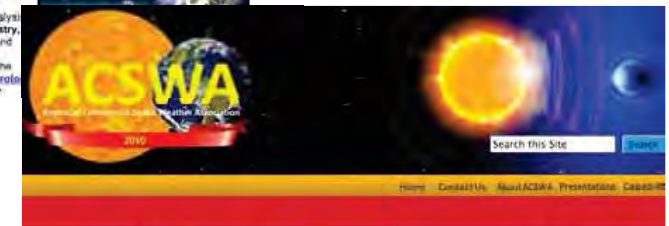
米国の宇宙天気

空軍

- 軍から宇宙天気情報の需要がある。空軍や海軍がそれぞれ宇宙天気研究や監視業務をNASA等とも協力しつつ推進
- 宇宙天気予報業務はNOAA(海洋大気局)
- 宇宙天気に関わる省庁横断のプログラムNational Space Weather Programを1994年に設立。NASA、国防総省、商務省、エネルギー省、内務省、国立科学財団が参加。
 - goal of the NSWP is to achieve an active, synergistic, interagency system to provide timely, accurate, and reliable space weather warnings, observations, specifications, and forecasts.
- 民間の宇宙天気サービス会社が複数ある。2010年にAmerican Commercial Space Weather Associationを設立
- 宇宙天気予報にとってキーとなるモニターの観測の多くを抑えている。太陽面(SDO, STEREO), 太陽風(SOHO)、太陽X線、高エネルギー粒子(GOES)



NSWP



ACSWA

欧州の宇宙天気

- ESA's Space Situational Awareness (SSA) Programme
2009年発足。2019年まで
- 3つのSSAインフラ
 - A. Survey and tracking of objects in Earth orbit
 - B. Monitoring Space Weather
 - C. Watching for NEO
- SSA preparatory pahse 2009-2012
 - この間の予算~54M€、うち産業界に30M€の発注
 - フランス、スペインに試験用のレーダー設置
- Current phase 2013-2016
 - この期間の予算46.5M€
 - "The current Phase II activities place increased emphasis on developing space weather and NEO services, while research, development and validation activities continue in the space surveillance and tracking domain"
 - Space Weather Coordination Centre設立
 - 技術実証衛星として、太陽、宇宙空間プラズマ観測装置も積んでいたProba-IIが、2013年からSSAプログラムに移行し、ESAの最初の"SSA mission"になる

Proba-2



欧州は宇宙天気をSSAの
主要なプログラムと位置づけ、
今後数年で強化の方向

中国、ロシアの宇宙天気

JCR-SW

● 中国

- ISESのregional centerはSpace Environment Prediction Center (CAS-NSSC-SED-SEPC)
- 宇宙天気関連科学の衛星は、ESAとの協力による磁気圏観測衛星Double Star (双星)などがある
- 有人活動サポートのために宇宙天気情報

● ロシア

- ISESのregional centerはInstitute of Applied Geophysics.
- IZMIRAN, IKFIAなどいくつかの研究機関が研究と予報を行っている。
- ロシアと合同の宇宙天気研究機関JRC-SWを2000に設立



The Russian-Chinese Joint Research Center on Space Weather

The Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (ISTP SB RAS) and the Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences (CSSAR CAS) have established the Russian-Chinese Joint Research Center on Space Weather (JRC-SW) in December 2000. The Agreement on scientific cooperation between the Chinese Academy of Sciences and the Russian Academy of Sciences' Siberian Branch signed on October 13, 1999, and the Agreement for joint studies on solar-terrestrial physics and its applications signed by the CSSAR CAS and the ISTP SB RAS on November 2, 2000 serve as a basis for creating the JRC-SW.

The JRC-SW has two co-directors:

- the ISTP SB RAS director Academician [G.A. Zhelezniakov](#)
- the CSSAR CAS Executive Director Prof. Ji Wu

The principal objective of the JRC-SW is to organize and promote successful cooperation between CSSAR and ISTP.

The particular research areas are defined here under as follows:

1. Solar activities related to solar disturbances.
2. Propagation of solar disturbances through the solar corona and interplanetary space.
3. Investigation of dynamic processes at different spatial and temporal scales, which are associated with geospace disturbances.
4. Investigation into the propagation of disturbances from high to middle and low latitudes of the Earth's ionosphere and atmosphere.
5. Diagnostics of the geospace, and forecasting technology.

During 5 years the scientific research work was carried out in the frame of 22 projects

The objectives of the Center include:

CAS: Chinese Academy of Science

NSSC: National Space Science Center

SED: Space Environment Division

SEPC: Space Environment Prediction Center

IZMIRAN: : Institute of Earth magnetism, ionosphere and radiowaves propagation

IKFIA: Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy

JRC-SW: Russian-Chinese Joint Research Center on Space Weather

韓国の宇宙天気

- 2011年にNational Radio Research Agencyの下部機関としてSpace Weather Center設立。通信のための宇宙天気サービス担当
- Korea Metteological Administrationが衛星運用のための宇宙天気サービスを担当
- 研究機関としてKASI、KOPRI、各大学
- 観測は国内の太陽電波、地磁気、イオノゾンデ等
- 米国SDO衛星のデータセンター(KASI)
- 衛星計画もある。



RAA: Radio Research Agency
 KMA: Korea Meteological Administration
 KASI: Korean Astronomy & Space Science Insititute
 KOPRI: Korea Polar Research Institute
 SDO: Solar Dynamic Observatory

その他の国

- インド: ISESにも参加。地上観測の歴史も長く宇宙天気関係の科学衛星も上げている。
- 南アフリカ
 - 2010年に宇宙機関SANSА(South African National Space Agency)設立、宇宙天気の部署を持つ。
 - アフリカで唯一のISESのregional center
- 日本や欧米を中心とした研究機関が地上観測網を展開(地磁気、GNSS地上局、レーダー、太陽観測等)している。
- 発展途上国の多くは、自国に置かれた観測装置を自国の宇宙科学・宇宙利用発展の基盤としたいと考えている。(宇宙天気は参入しやすい宇宙分野)
- これらの国々は、通信や国土管理などで宇宙利用への関心も高い
- 日本でも、各大学・研究機関が地磁気、レーダー、太陽望遠鏡などを発展途上国に展開しており、それをベースにしたキャパシティビルディングや人材育成、人材交流を行っている。

日本の宇宙天気アセット： 情報通信研究機構(NICT)宇宙天気センター

- 業務として宇宙天気情報を提供。
- ISESの日本におけるregional center
- ウェブ、メール、RSS、Fax等で宇宙天気情報を発信。
- 国内の主なユーザは衛星運用機関、航空局及び航空機関、電力機関、短波利用機関、物理探査、大学・研究機関、アマチュア無線など
- 太陽電波やイオノゾンデ等の独自の地上観測装置も持っているが、データは基本的に公開されている各国の衛星データを利用。

The screenshot shows the SWC website interface with the following key elements:

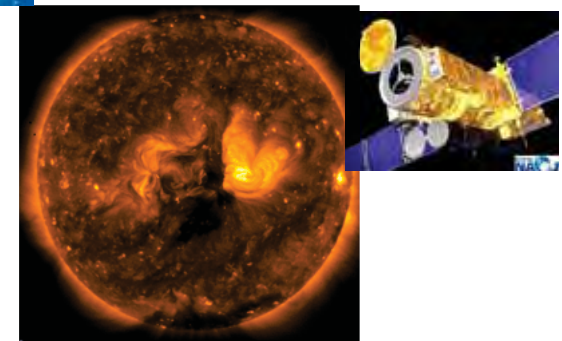
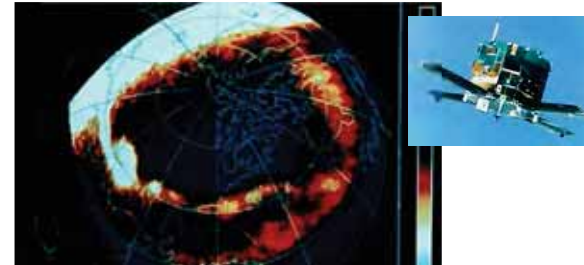
- Header:** SWC 宇宙天気情報センター (Japan Space Weather Information Center) with navigation links for HOME, 臨時情報, 最新の宇宙天気データ, 予報, データ配信サービス, お問い合わせ, RSS, 用語集, and English.
- Main Content:**
 - ひので SOHO 黒点:** Displays solar images and sunspot data (NOAA 黒点数: 180, F10.7: 169).
 - フレア:** Lists detected solar flares with details like 2/10 14:03 C3.0.
 - 無線通信:** Shows communication status for various regions (e.g., 雅内, 国分寺, 山川, 沖縄).
 - 太陽風(ACE):** Provides solar wind speed and magnetic field data.
 - 衛星運用:** Lists active satellites and their status.
 - 航空機関係:** Shows flight status for aircraft like the Norilsk and Poker Flat.
 - 宇宙天気予報:** Provides forecasts for flares, geomagnetic disturbances, and proton events.
- 臨時情報 (Emergency Information):** A red banner announcing a solar flare event on 2014/02/10 09:40 (JST), mentioning an M1.0 flare.
- 今日の宇宙天気情報:** A summary section dated 2014/02/09 15:00, reporting on C-class flare activity and solar activity levels.



<http://swc.nict.go.jp>

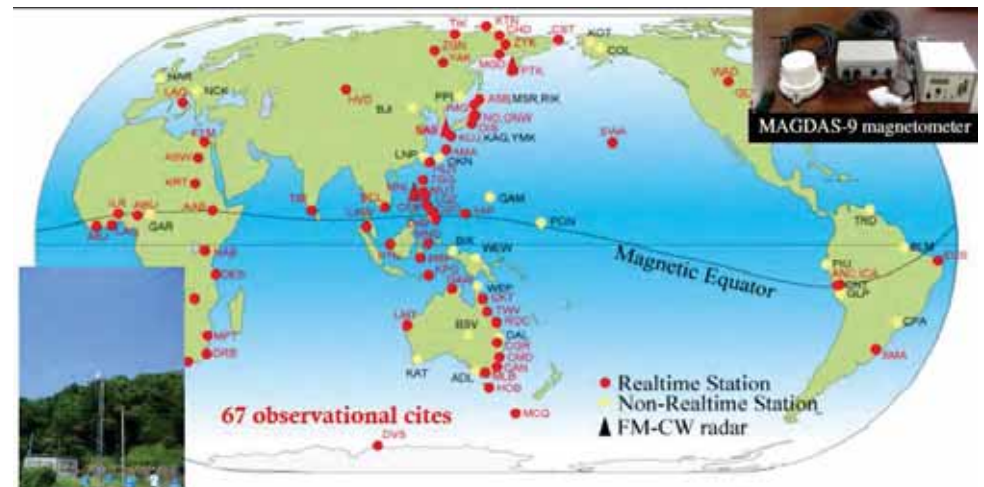
日本の宇宙天気アセット:JAXA

- 研究開発本部宇宙環境グループ
 - JAXA衛星に搭載した宇宙環境計測機による宇宙環境計測や、耐放射線衛星設計に関する技術支援、衛星不具合現象に関する技術協力、宇宙環境変動に伴う衛星運用業務に対する情報提供等のプロジェクト協力等を行っている。
 - 計測したデータや宇宙環境モデルはデータベースSEESで公開されている(しばらく更新が止まっていた?今もリンク切れがある)
- 宇宙科学研究所
 - 宇宙天気に関連した科学衛星
 - 運用中:あけぼの(1989~,オーロラ)、GEOTAIL(1992~,磁気圏)、れいめい(2005~,オーロラ)、ひので(2006~,太陽)
 - 将来ミッション:ERG(2015~(予定),放射線帯)、Solar-C(WGで検討中)
 - 基本的には宇宙天気予報の基礎研究を含む学術研究目的でデータが公開されているが、operationalな宇宙天気予報に使う体制にはなっていない。
 - 「ひので」のデータは軟X線領域でもっとも高解像度な太陽全面像等が、宇宙天気情報サイト等で一部利用されている。



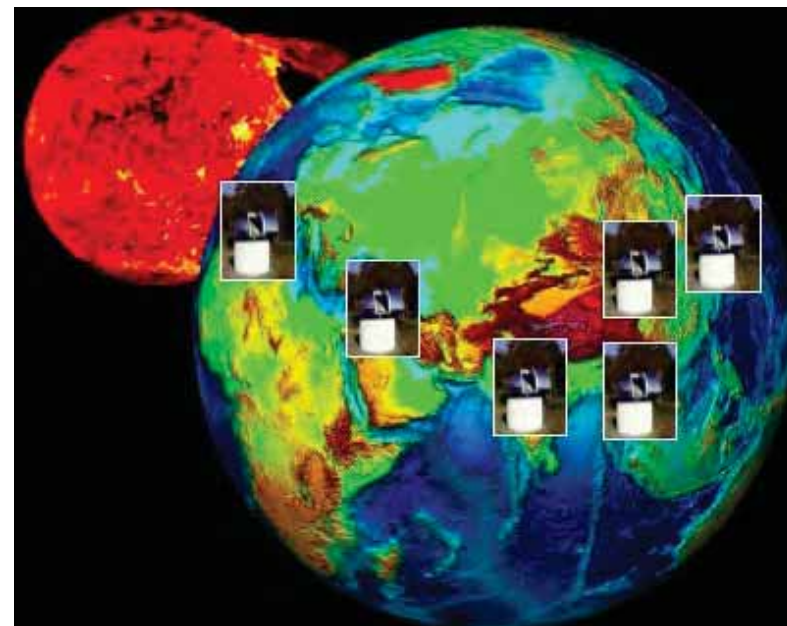
日本の宇宙天気アセット： 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター(ICSWSE)

- 全球地磁気ネットワークMAGDAS運用
- 国際サマースクールの継続的開催
(2011ナイジェリア、2012インドネシア、
2013コードジボアール、2014ペルー)
等、発展途上国に展開した観測装置
を基盤にしたキャパシティビルディング



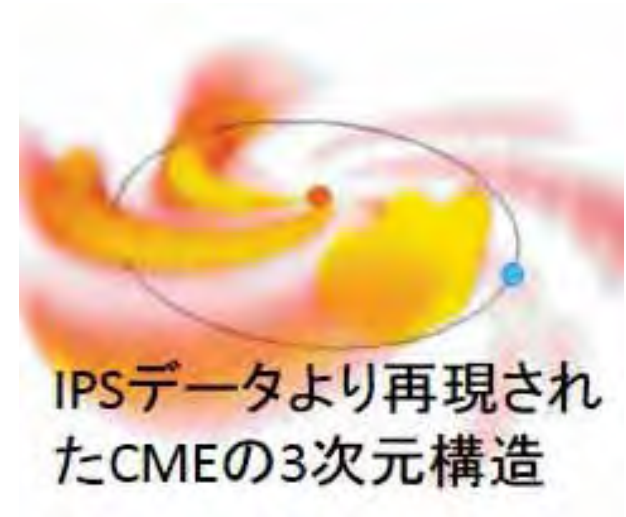
日本の宇宙天気アセット: 京都大学

- 太陽地上観測(飛騨天文台)
- 太陽H α 地上観測ネットワークCHAIN: 世界の太陽地上観測をネットワーク化。リアルタイムな太陽全面観測像を提供(現状、ほぼリアルタイム運用ができてい。衛星運用にも一部用いられている。
- 飛騨天文台の望遠鏡をペルーへ移設(2010)し、観測ネットワークの充実と同時に、現地の研究者・学生の人材育成を行い、発展途上国でのキャパシティビルディング。
- アルジェリア、サウジアラビア等とも望遠鏡設置の検討中
- 地磁気世界資料解析センターが、地磁気擾乱の指標として世界的に使われているAE、Dst、ASYインデックスを算出、発表
- 高層大気レーダー観測



日本の宇宙天気アセット:その他

- 名古屋大学太陽地球環境研究所
 - 太陽地球環境を専門とする大学共同利用機関
 - 電波シンチレーションによる太陽風電波観測
 - オーロラレーダー観測
 - モデリング・データセンター
 - 国立天文台:太陽可視光・電波観測
 - 東北大学:太陽・惑星電波
 - 信州大学:宇宙線観測による太陽
-
- 大学間連携による地上観測のネットワーク化の検討が進められている。
 - 地上観測のネットワーク化と、データのリアルタイム提供・共有体制の強化によるoperationalな宇宙天気予報への貢献は世界的な課題であり、日本がリーダーシップを取れる分野の一つ



提言

- 国内体制の強化
 - 国内ニーズの把握:NICTが主催するユーザーフォーラムがあるのでそれを活用
 - 高精度測位アプリケーション、航空機運航(ICAO勧告)等の新たなニーズ
 - 米NSWPのように、宇宙天気(SSA)に関して省庁・機関横断型で情報交換する場があることが望ましい
- 宇宙天気は国際協力で日本がリーダーシップを発揮できる分野
 - 国際協力によるデータ共有、共同観測が世界的な流れ
 - 学術コミュニティを中心に強い基盤が既にある
 - 地上観測ネットワークを基盤とした発展途上国でのキャパシティビルディングと人的ネットワークの強化
- 学術コミュニティの持つリソースの活用
 - 現在も宇宙天気情報は主に研究用の観測(地上観測、科学衛星)が担っている
 - 日本の機関が国際展開している地上観測ネットワークは、特に発展途上国との協力の基盤になる
 - 各国の観測サイトにデブリ監視望遠鏡を置くなどして、デブリ/NEOを含めた包括的なSSAの協力体制を作れる可能性もある
 - 研究目的観測の場合、継続性、データの公開体制が課題。世界的にも、ResearchからOperationalな観測体制をどう作ってゆくかが課題と認識されている