

太陽研究最前線体験ツアー
於 飛騨天文台 2013年 8月 7日

「太陽観測を通じた宇宙天気研究」



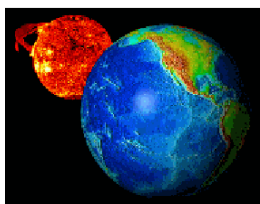
京都大学大学院理学研究科 附属天文台
(飛騨天文台)
助教 上野 悟

はじめに

太陽を観測・研究する大きな3つの意義

- 1) 恒星の一つとしての太陽の理解
- 2) プラズマ実験室としての太陽大気中の活動現象の理解
- 3) **宇宙天気**変動の源としての太陽活動の理解

はじめに



- ・過去、東西冷戦世界における宇宙開発競争のもと、地球近傍宇宙環境を調査する要求
→宇宙天気研究の始まり
- ・ポスト冷戦時代に移り「宇宙天気」、「太陽地球間環境」というテーマは、純粋に科学的な研究対象として、さらに現代経済文明社会に影響を与える要因の一つとして、この二十年近くの間急速に普及し、発展を続けている

- ・1990～1997；太陽地球系エネルギー国際協同研究計画 (STEP) by 国際学術連合会議/太陽地球系物理学科学委員会
- ・1998～2002；STEP理論解析国際共同研究(S-RAMP)
- ・2004～2008；宇宙天気国際共同研究プログラム(CAWSES)
- ・2009～2013；宇宙天気国際共同研究プログラム(CAWSES-II)

本日の講義の内容

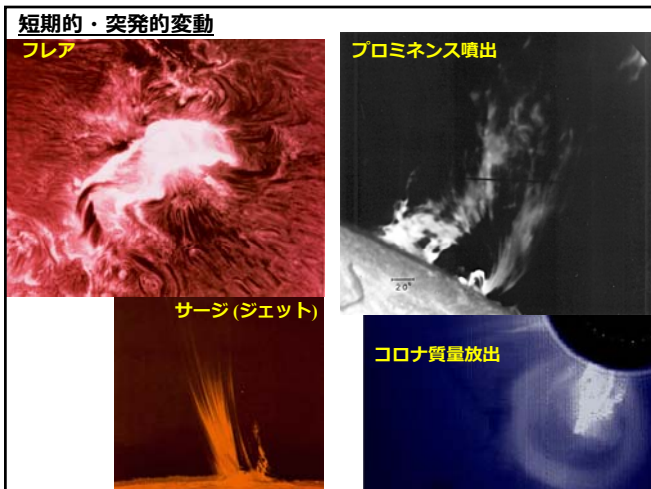
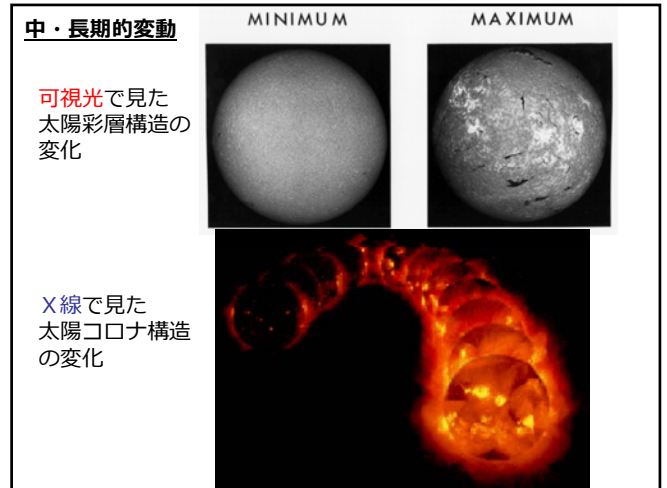
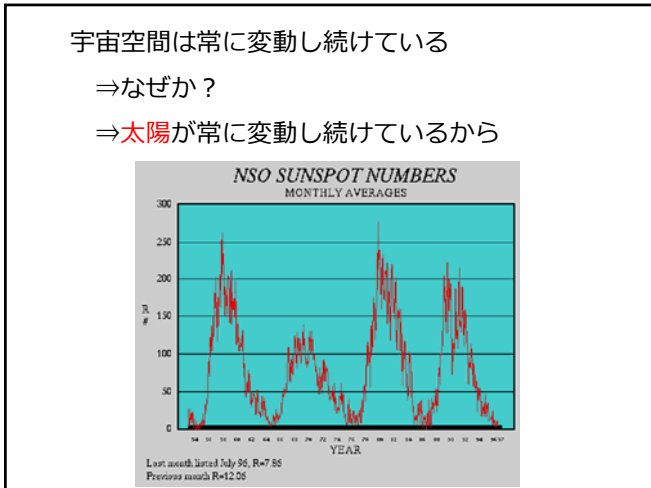
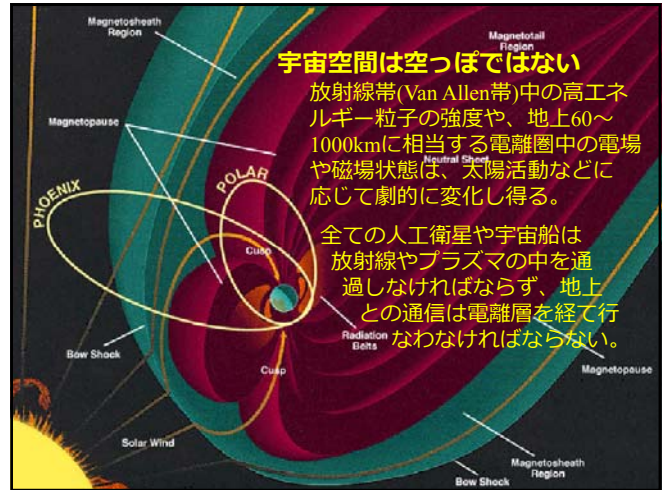
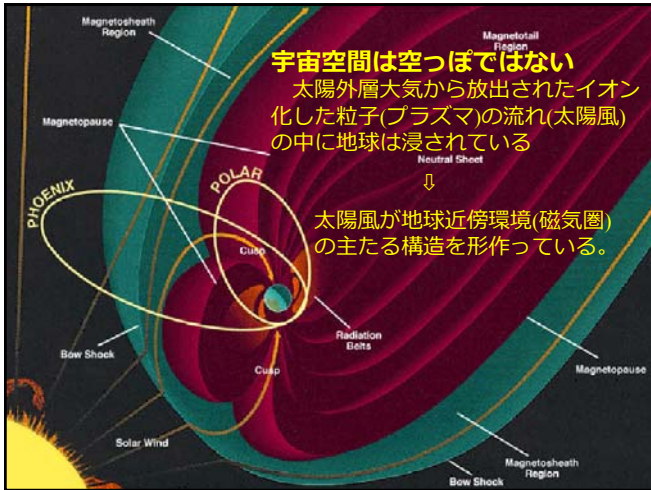
- (1) 宇宙天気の概要
- (2) 地球を取り巻く宇宙空間・超高層大気の構造
- (3) 宇宙天気に対する太陽・宇宙からの影響
- (4) 様々な宇宙天気現象
- (5) 宇宙天気現象の地球気候や人類社会への影響
- (6) 京都大学・理・附属天文台での地上光学観測

(1) 宇宙天気の概要

宇宙天気とは・・・

地球環境や地球上のテクノロジーに対し影響を与える、宇宙空間環境。

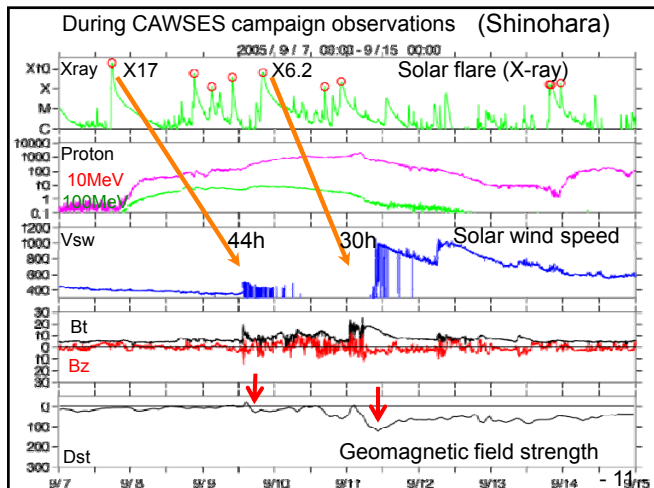
主に太陽活動の地球磁場や大気への作用、宇宙線、惑星間空間の微少天体やゴミ、などにより影響を受ける。



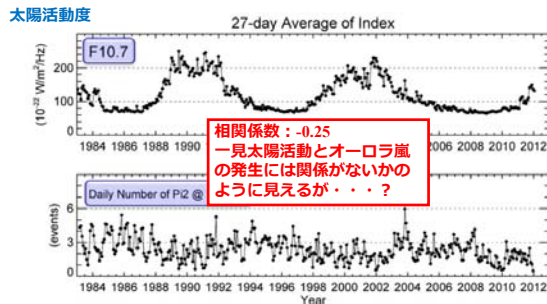
これらの激しい太陽活動現象
 ↓
 惑星間空間中や、地球磁気圏内のプラズマ粒子の構成や電流分布などを劇的に変動させ得る。

しかし、太陽活動現象と宇宙天気現象が1対1で単純明解に対応付けられていないように見える事例が多数存在。
 ⇒ 宇宙天気研究の大きな課題

例) オーロラ
 宇宙天気が乱された際に、地磁気嵐に伴って現れる現象として、最も分かりやすい現象のひとつ。
 しかし、大きな太陽爆発現象が発生したからといって、必ず発生する訳ではない。



典型的事例：
オーロラ嵐・サブストーム発生頻度と太陽活動の相関



サブストーム発生数
(低緯度地磁気脈動(Pi2: 周期40—150s 減衰波=サブストーム発生指標)

Reference: 能勢 et al. 2012 (http://www.iugonet.org/meetings/2012-02-22_23/6_1_nose.pdf)

宇宙天気の現代社会への影響：

日常生活のほとんどにおいて、我々が宇宙天気を直接意識することは少ないかも知れないが、太陽からの宇宙環境への擾乱が大きくなった時、人類の科学技術には、宇宙空間、地上に関わらず影響を受けるものが多くある。

- 宇宙空間：無数の人工衛星(科学、気象、GPS、放送、携帯電話、偵察等々)、宇宙ステーション、スペースシャトルなどの宇宙船
- 地上：変電所、石油パイプライン、電離層を利用した無線通信(ラジオ、TV、航空管制等々)

宇宙天気の地球自然環境に対する影響

(例)

- ・ 高層雲量の周期的変動
- ・ 気温の周期的変動 (樹木の年輪)
- ・ 海面温度の周期的変動
- ・ 地層や氷河中の放射性同位体含有量の周期性
- ・ 約20年周期の超高層大気の電気伝導度 (地磁気の日変動度) の変化と太陽紫外線量との関係(?)
- ・ 太陽活動周期の長さの変動と陸上大気温度変動

宇宙天気は予報できるのか？

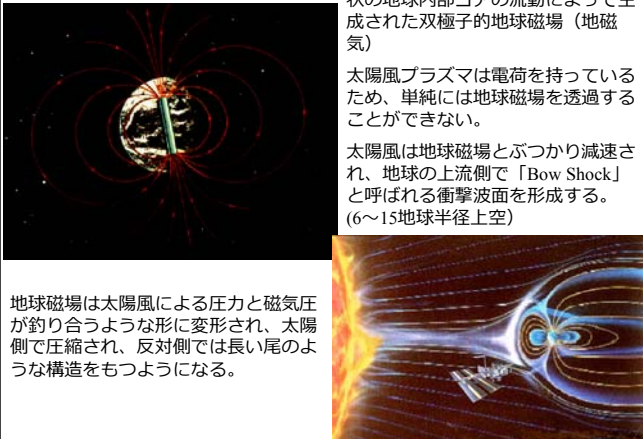
地球上の気象に対する「天気予報」は近年の気温、気圧、雲などの物理量の3次元的な分布の観測点の増加と、コンピュータによるシミュレーションの発達により、急速に精度が良くなって来た。

宇宙天気予報についても、観測点の比較的多い地球磁気圏内においては、コンピュータシミュレーションと合わせることで、太陽からの擾乱の到達が人工衛星上で観測されてから地球の磁場に変動が観測されるまでの時間や、その変動の大きさを、ある程度予測可能になってきている。今後更に太陽付近や惑星間空間のリモート観測の拡充、太陽地球間観測衛星の増設、3次元シミュレーションの増強等により、少なくとも太陽面での活動現象の発生時点の情報から、地球で起こりうる現象の規模や時刻が予報ができるようになる可能性は十分ある。

(2) 地球を取り巻く宇宙空間・超高層大気の構造

- (a)地球磁気圏
- (b)放射線帯
- (c)超高層大気、電離圏・電離層

(a) 地球磁気圏

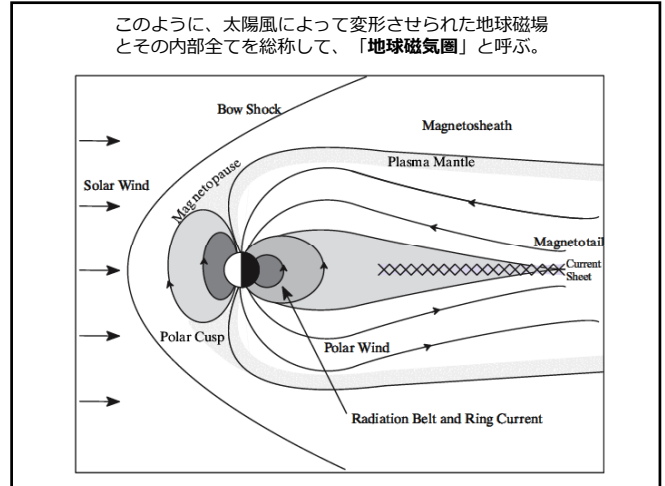
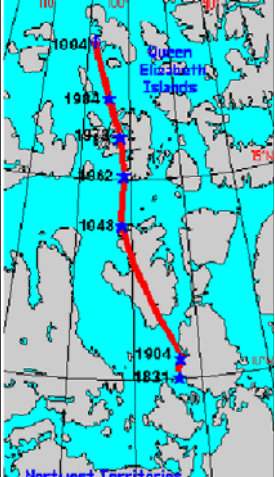


地球を取り囲む磁気圏の源は、液体状の地球内部コアの流動によって生成された双極子の地球磁場（地磁気）

太陽風プラズマは電荷を持っているため、単純には地球磁場を透過することができない。

太陽風は地球磁場とぶつかり減速され、地球の上流側で「Bow Shock」と呼ばれる衝撃波面を形成する。(6~15地球半径上空)

地球磁場は太陽風による圧力と磁気圧が釣り合うような形に変形され、太陽側で圧縮され、反対側では長い尾のような構造をもつようになる。

北緯80°

北緯70°

【参考】磁気圏形状の長期的変化

地球磁場の極は自転軸の極とは一致しておらず、かつ常に変動している。

変動のしかたには、ほとんど規則性は見られず、過去、速い時は1000年程度で南磁極と北磁極が入れ替ったこともあったという形跡が確認されている。

つまり、地球磁気圏の形状も、長期的に見れば大きく変動してきたであろうと考えられる。

【参考】磁気圏形状の短期的変化

例えば太陽風等の圧力が強い時、磁気圏は圧縮されて一時的に縮小する。

その様な時には静止軌道衛星の軌道の内側にまで達し、衛星が直接太陽風プラズマにさらされることもある。

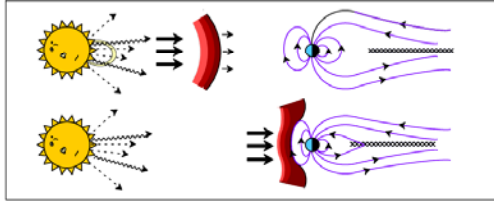
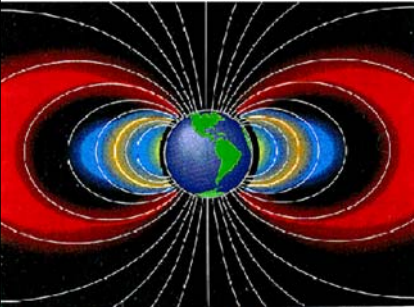


Figure 5. An ejection from the Sun travels to Earth and distorts Earth's magnetic field, resulting in geomagnetic activity.

(b) 放射線帯

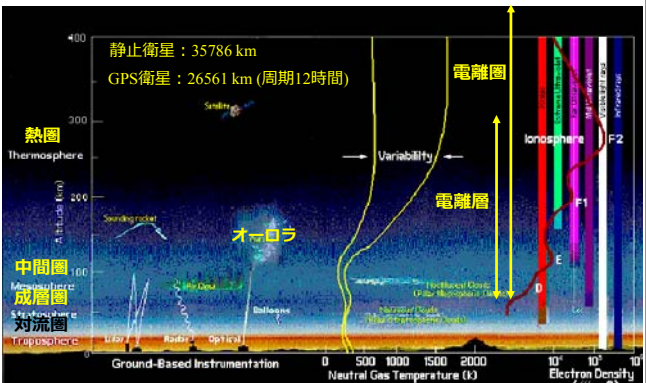
地球磁気圏中には様々な起源、密度、エネルギーを持った電子・陽子やイオンが混在している。その中でも特に高エネルギー粒子群が補足されている領域が放射線帯(Van Allen 帯)である。



- 1958年アメリカの人工衛星エクスプローラ1号に搭載のガイガーカウンタによる測定で発見。
- 内帯と外帯の2重構造を持つ
- 内帯
赤道上高度 2000 - 5000 km
陽子や宇宙線が多い
- 外帯
赤道上高度10000 - 20000 km
電子が多い
- 放射線帯内の環境変動によりそこを通過する宇宙船・飛行士への悪影響を及ぼし得る。

Outer Van Allen Belt, Inner Van Allen Belt, Trapped ACR (Interstellar matter), Energetic Secondary Ions

(c) 超高層大気と電離圏・電離層



静止衛星：35786 km
GPS衛星：26561 km (周期12時間)

熱圏 (Thermosphere), 中間圏 (Mesosphere), 成層圏 (Stratosphere), 対流圏 (Troposphere)

電離圏 (Ionosphere), オーロラ (Aurora)

300-400km上空の大気密度は、地上の $1/10^{10}$ 程度まで下がるが、太陽からの紫外線照射量に応じて 10 倍程度の変動が起こる。

電離層におけるイオンの生成消滅プロセス

(太陽からの紫外線) (宇宙線) + (地球大気原子 1) ⇒ (電子) + (イオン 1)

数分~数時間後

(イオン 1) + (地球大気原子 2) ⇒ (イオン 2) + (地球大気原子 1)

日中は太陽からの紫外線などの照射で電離層下面は高度約60~80kmまで下がって来るが、夜間はイオンが減少し、約100kmまで上昇する。

電離層下面での屈折率の変化が電磁波の内、短波電波(HF: 3 - 30 MHz)より長波長側で大きくなるため、これらの波長帯は電離層において屈折反射する。特に短波は、他の波長に比べて安定して高度約100kmで反射されるため、遠距離通信に適している。

例：短波ラジオ放送、洋上航空無線、船舶無線、アマチュア無線など

一方、中波(AMなど)は昼間 80 - 100kmのイオン層で減衰してしまうが、夜間は100km辺りで反射する性質を持ち、夜間だけ遠方まで電波が届く現象が起こる。

短波ラジオ放送、洋上航空無線、船舶無線、アマチュア無線など

TV放送、GPSなどの放送・通信衛星用高周波電波

Reflect off Ionosphere / Pass through Ionosphere

kHz radio MHz GHz microwaves

VLF LF MF HF VHF UHF SHF EHF

OMEGA signals Loran-C signals GPS signals

(3) 宇宙天気に対する太陽・宇宙からの影響

- (a) 紫外線
- (b) 宇宙線
- (c) フレア、CME
- (d) 太陽風

超高層大気における諸現象

- 下層大気からのエネルギー・運動量の流入
- 電離圏・プラズマ圏での電磁エネルギー輸送・化学反応
- 磁気圏-電離圏結合

太陽からの紫外線、宇宙線

太陽風・CME等からのエネルギー注入

(a) 紫外線 (UltraViolet Ray)

◆ 黒体輻射 ◆

高温に熱せられた物質からは、広域な波長に渡る、連続したスペクトルが放射される。特に、放射とガスの温度が熱力学的平衡状態になっているときに放射されるスペクトルが、「黒体輻射」と呼ばれている。

太陽大気中では、ガスと放射がほぼ熱力学的平衡状態になっており、太陽大気上層や宇宙空間、地球大気での吸収や散乱による変化を除けば、地上で観測される太陽光スペクトルは、ほぼ黒体輻射で近似できる。

■ 黒体輻射により 温度 T の物質から放射される、振動数ν (波長λ) の電磁波の放射エネルギー：

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

(プランク分布)

■ 黒体輻射のピーク波長と温度の関係

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.898 \times 10^7$$

(波長単位はÅ、温度単位はK) (ウィーン法則)

太陽の紫外線放射の地球大気への影響

電離圏・熱圏に影響を与える波長域

極小期 極大期

Extreme UV 10-120 nm

Far UV 120-200 nm

Middle UV 200-300 nm

Near UV 300-400 nm

Visible and IR

Thermosphere Mesosphere Stratosphere Troposphere

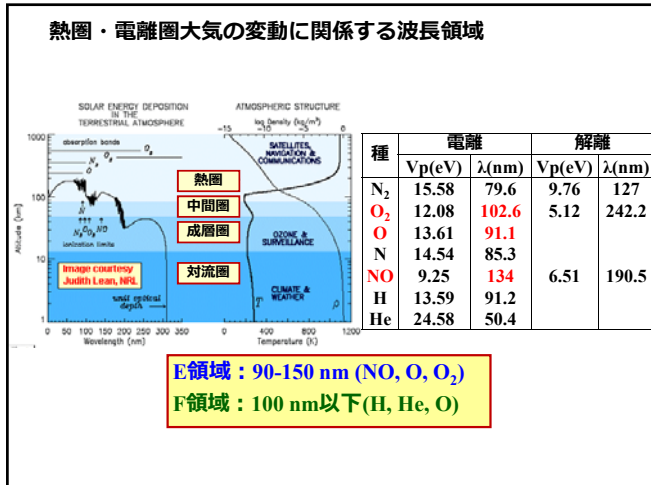
IR Cooling

大気密度

大気温度

電離圏・熱圏に

EUV/UV波長領域の太陽放射の変動は、地球超高層大気(中間圏-熱圏・電離圏)の熱構造や組成分布を大きく変える

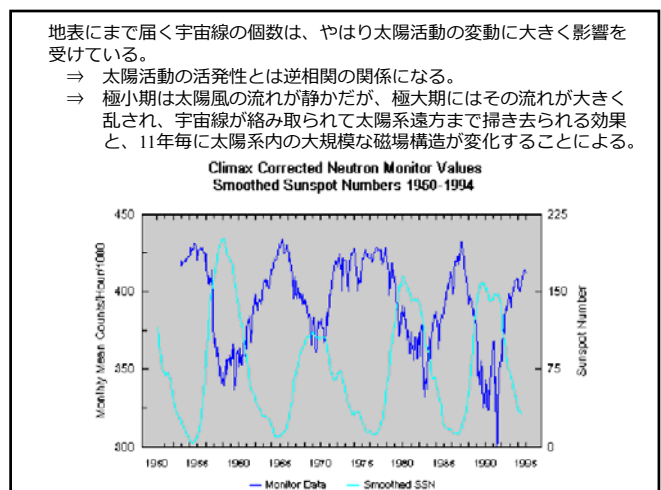
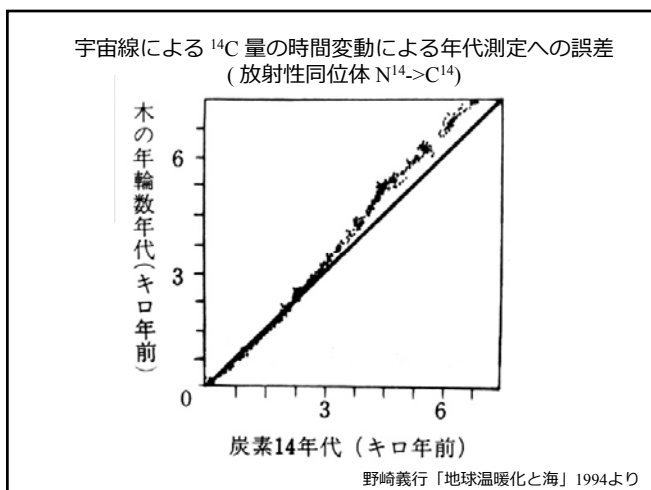
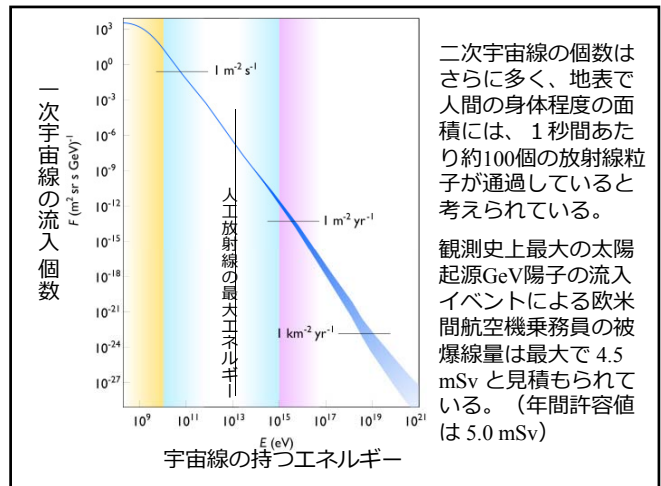
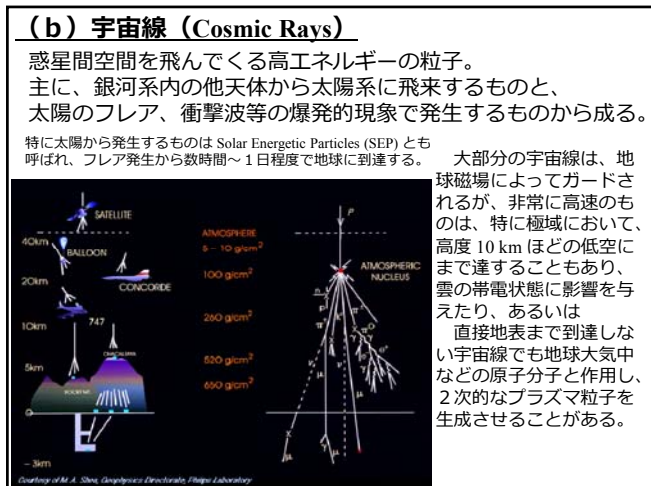


各種の波長領域の太陽活動による変化の割合

TABLE 1. Coupling Between the Sun's Radiative Output and the Terrestrial Environment
Lean, RG, 1991

Spectral Band	Solar Source Region	11-Year Cycle Variation	Terrestrial Absorption Region	Absorbers
X rays, <10 nm	corona	10x to 1000x	mesosphere, 150-300 km	O ₂ , N ₂ , O
10-120 nm	corona, transition region, chromosphere	2x to 10x	thermosphere, 150-300 km	O ₂ , N ₂ , O, N
Ly α, 121.6 nm	upper-middle chromosphere	2x	mesosphere, 60-100 km	O ₂ , H ₂ O, NO, CH ₄ , CO ₂
125-175 nm	chromosphere temperature minimum	50%	thermosphere, 100-160 km	O ₂ , SRC
175-205 nm	upper photosphere	15%	stratosphere, 20-80 km	O ₂ /SRB, H ₂ O, HCl
205-250 nm	photosphere	4%	stratosphere	O ₂ , O ₃ , HCl, CFCs
250-300 nm	photosphere	0.5%	stratosphere, troposphere	O ₂ , H ₂ O, NO ₂ , ClONO ₂ , HOCl, HNO ₃
300-400 nm	photosphere	0.1%	troposphere, 0-15 km	same as 250-300 nm band
Total: 48% at 400-800 nm	photosphere	0.08%	troposphere, surface, ocean	O ₂ , H ₂ O, CO ₂

120 nm以下の波長域: 太陽活動11年周期で2-10倍以上も変化
125-175 nmの波長域: 太陽活動11年周期で50%程度の変化

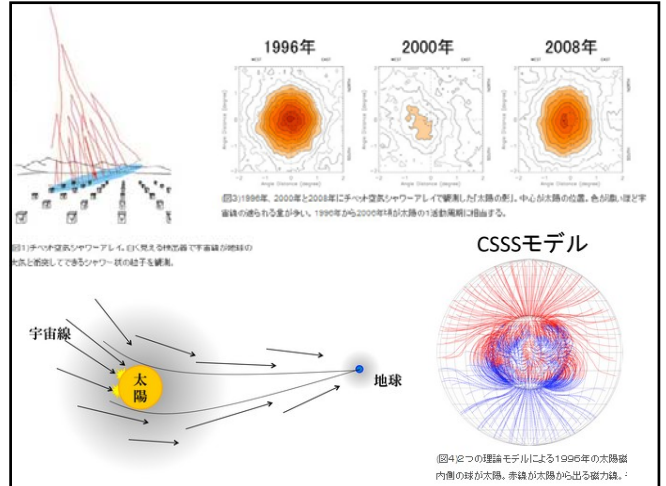


雑誌名：
Physical Review Letters
論文タイトル：
Probe of the Solar Magnetic Field Using the "Cosmic-Ray Shadow" of the Sun
著者：
K. Hakamada, J. Huang, K. Kawata, K. Munakata, M. Nishizawa, M. Ohnishi, M. Takita, T. Yuda et al. (The Tibet AS γ Collaboration)

宇宙線検出器アレイ

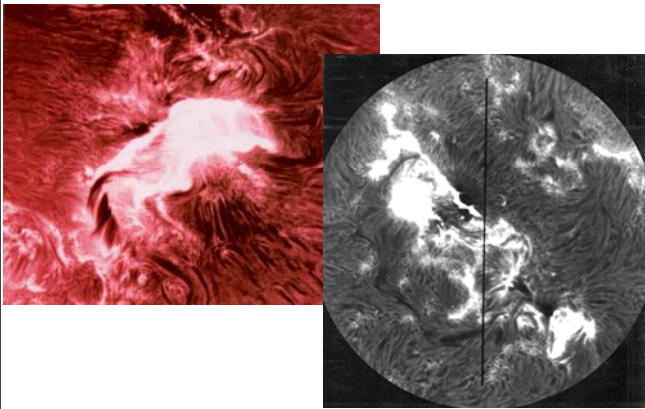


設置場所：中国チベット自治区羊八井(ヤンパーチン) 標高4300メートル

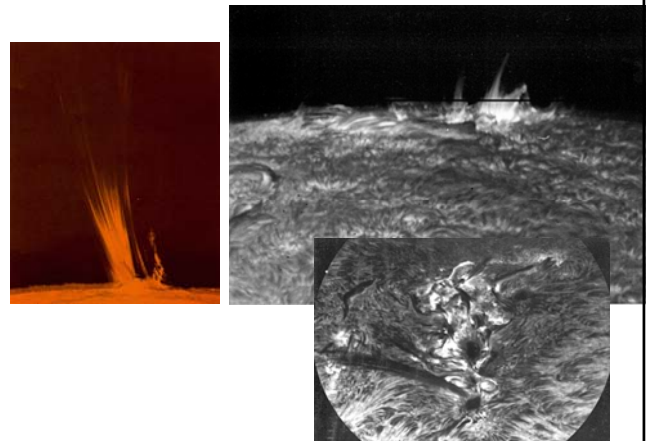


(c) フレア、CME

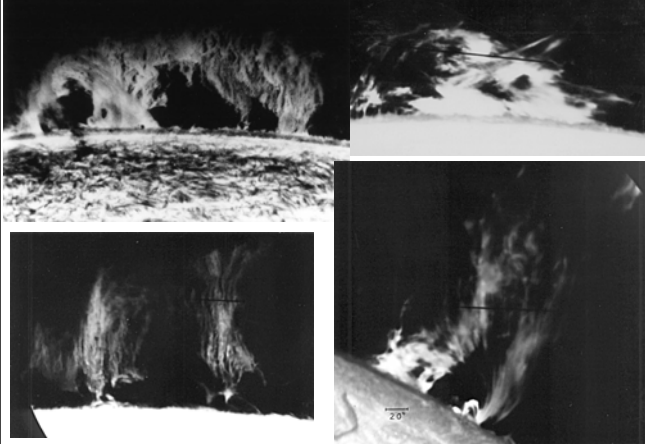
フレア (爆発現象)



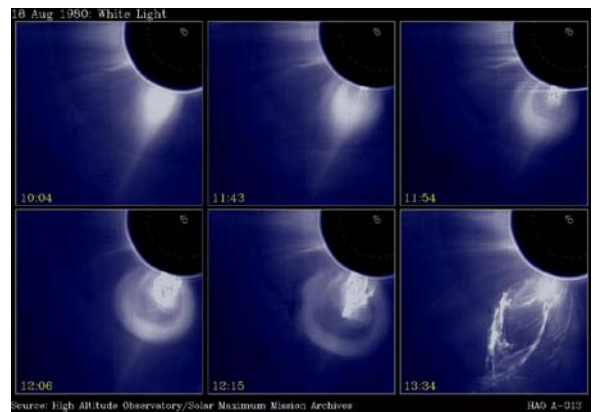
プラズマジェット (サージ、マクロスピキュール等)

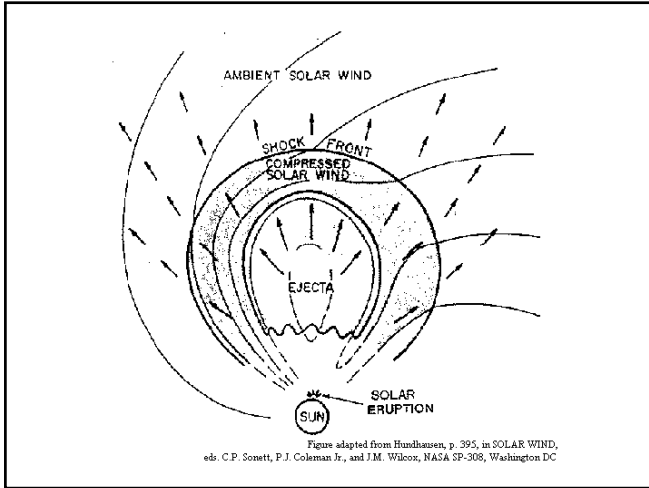


プロミネンス (紅炎)



コロナ質量放出 Coronal Mass Ejection (CME)





(d) 太陽風 (Solar Wind)

コロナ中の高温電離ガス(プラズマ)が太陽から動径方向外向きに流れ出す現象。

典型的速度：400~800 km/s

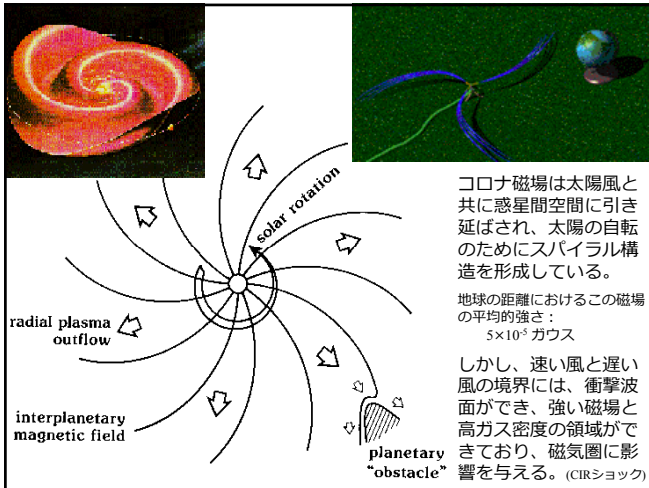
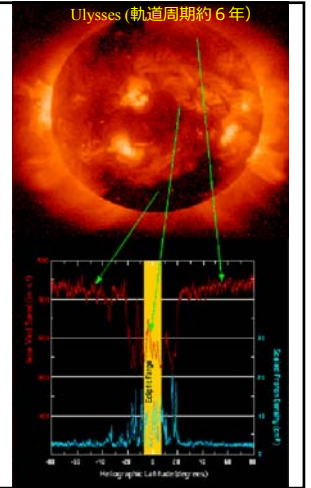
地球の距離での典型的密度：

中性子約 8 個/cm²

電子 約 8 個/cm²

& より少量のイオン(Heなど)

ただし、太陽面上からは非一様に流出していて、「コロナホール」と呼ばれる、コロナの低温低密度領域からは希薄な高速風が、黒点領域からは高密度の低速風の流出が確認されている。



(4) 様々な宇宙天気現象

- a) 地磁気嵐 (ストーム)
- b) オーロラ嵐 (サブストーム)
- c) オーロラ
- d) デリンジャー現象
- e) 放射線帯の汚染
- f) 太陽高エネルギー粒子の飛来
- g) 電波ノイズ放射

地磁気嵐 (ストーム)

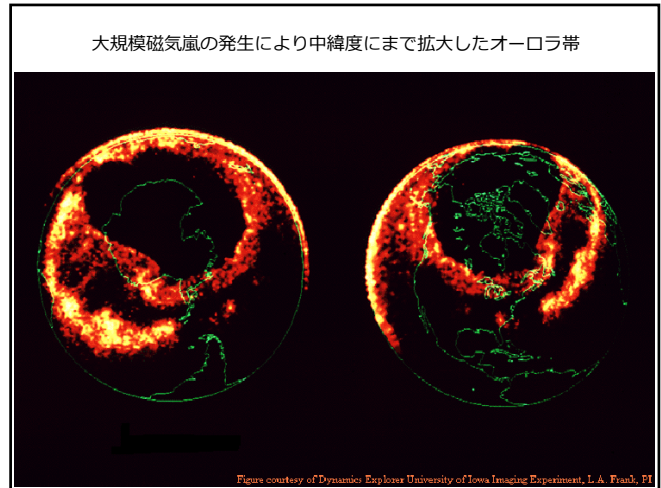
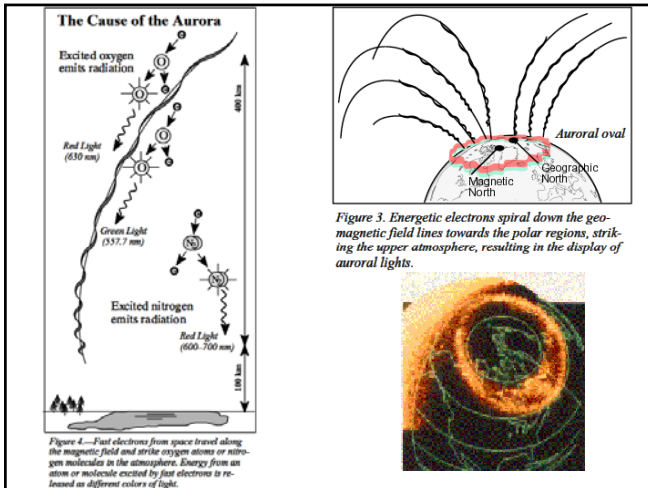
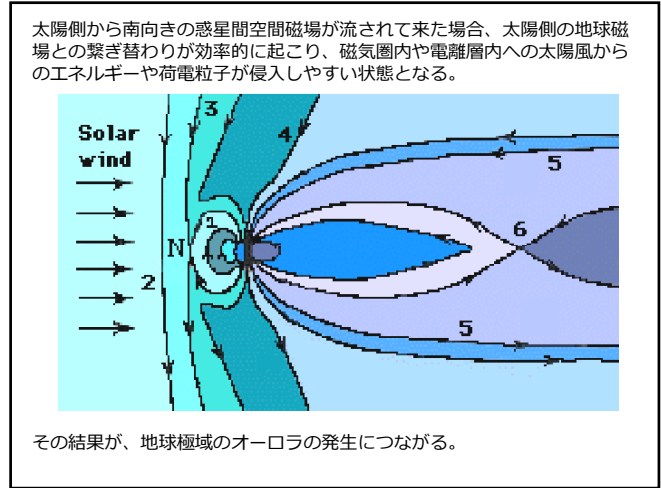
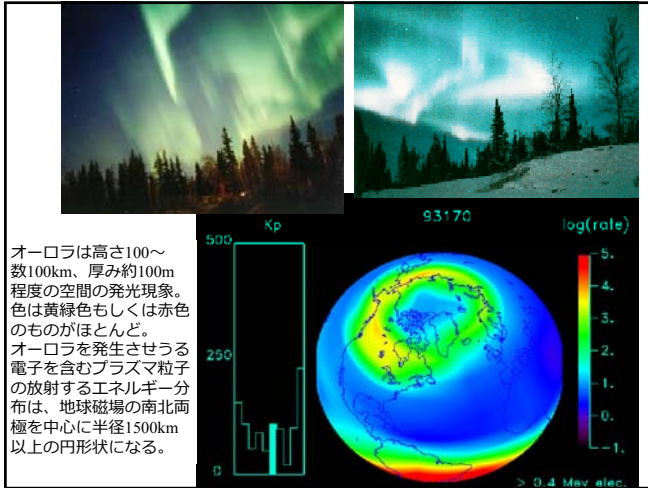
地磁気嵐は赤道領域周辺で発生。
地球上最大規模のエネルギー現象。

- 磁気圏内部に太陽からCME等により大量のエネルギーが注入
- 磁気圏内の対流が促進
 - 高エネルギー粒子が地球半径の2.5~3倍の高さ領域に閉じ込められてさらに加熱が進む。
 - 地球を取り囲むような電流系を発生させる
 - 地磁気の大幅な変動を誘発

オーロラ嵐 (サブストーム)

オーロラ嵐は太陽風やCMEによって磁気圏プラズマシートに蓄えられたエネルギーが突如解放される(磁気リコネクション?) ことによる現象。

極域(磁気緯度65~75度付近)の主に夜側でオーロラを発生させる。
極域に加速された電子が降下してくる。
赤道域のプラズマシートは、地球に向かって低下し、静止軌道衛星の高さ(6.6地球半径)よりも低い5地球半径ほどまでに至り、衛星の帯電障害などを起こす原因にもなる。

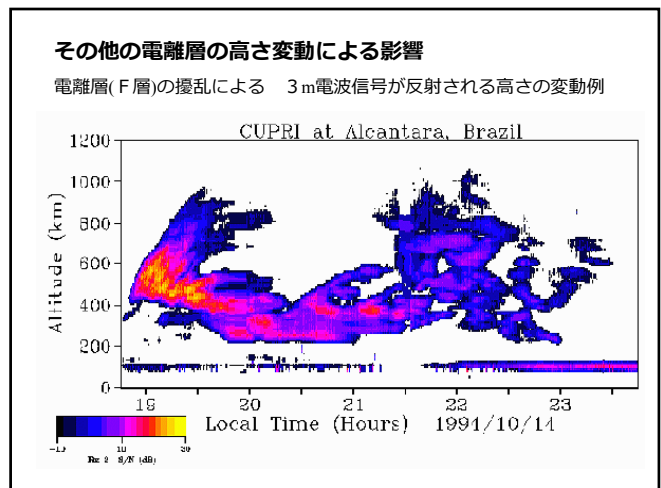


デリンジャー現象(Dellinger Phenomenon)
(短波障害(SWF; Short Wave Fadeout) または突発性電離層擾乱(SID; Sudden Ionospheric Disturbance)とも呼ばれる)

多くの場合、持続時間は数十分から数時間の程度。まれに数時間以上も続く場合もある。

太陽フレアが主な原因。太陽フレアで発生したX線や紫外線が電離層に到達し、電離層のD層(60～100km)の電子密度が増加する。

通常、短波(3 - 30 MHz)は、D層を通過し、F層(100km)で反射されるが、この現象が発生すると電子密度が増大したD層で短波が吸収されるようになり、長距離通信が不能となってしまう。



太陽高エネルギー粒子の飛来による電離層擾乱：
電離層の擾乱による電離層の反射を利用した無線通信への被害



PCA = Polar Cap Absorption; 流入する紫外線、X線、高エネルギー粒子などによる極域での電離層の擾乱現象

放射線帯汚染

地磁気嵐が起こると放射線帯中の高エネルギー電子はいったん消失した後、磁気嵐の回復に伴い、元々の量の数倍～数十倍まで増加する。

その様な状態で人工衛星が放射線帯を通過すると、表面や深部に帯電を発生させて、ダメージを起こし得る危険性が高まる。

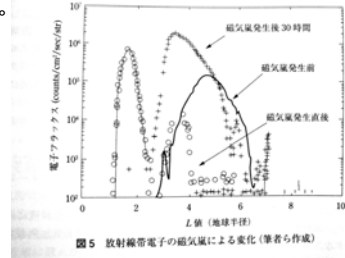
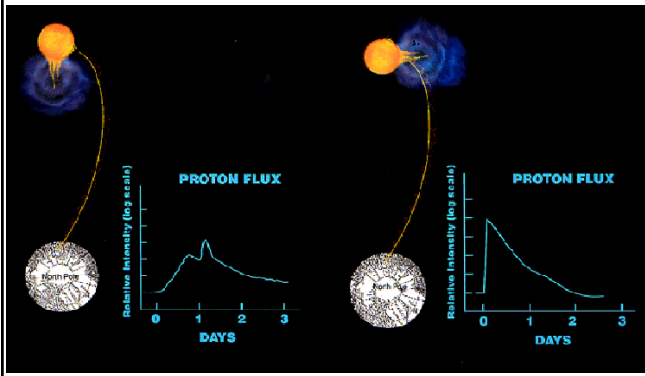
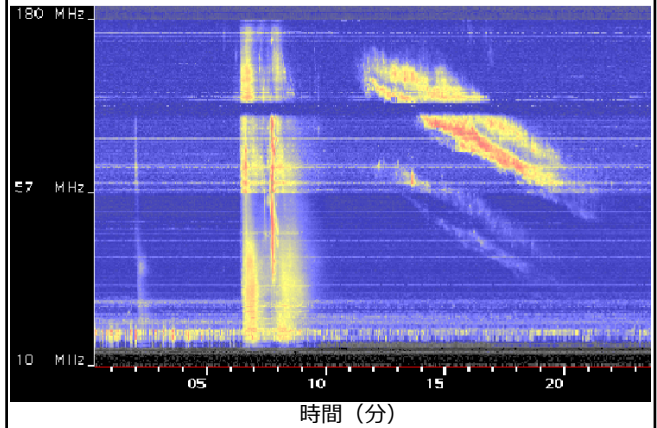


図5 放射線帯電子の磁気嵐による変化(筆者ら作成)

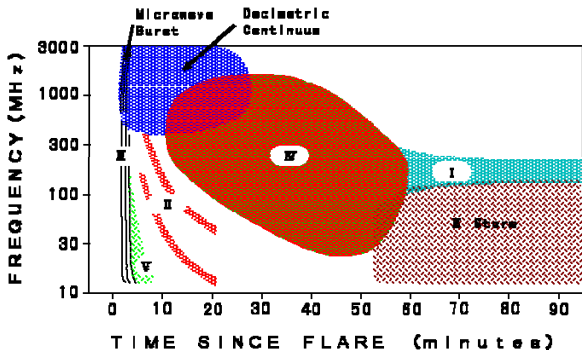
フレアの発生位置による高速粒子流の時間変動の違い



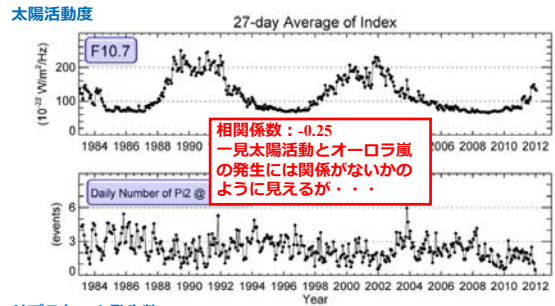
電波ノイズ放射：
太陽フレアから発生する電波バースト



太陽フレアから発生する電波バースト
短波、FM、VHF、UHFなどの通信電波波長帯と重なる

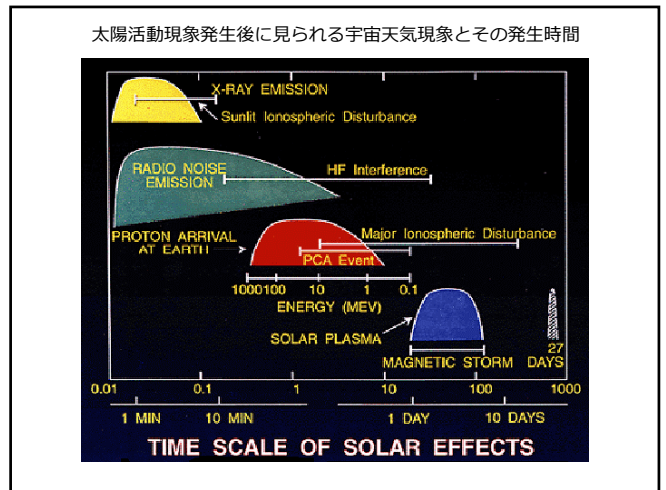
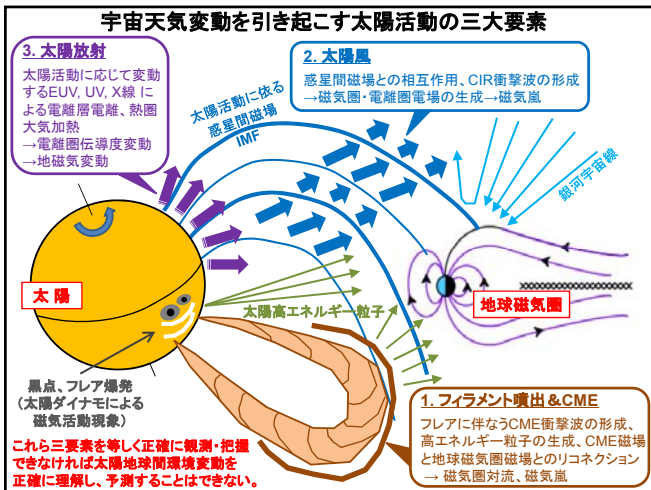
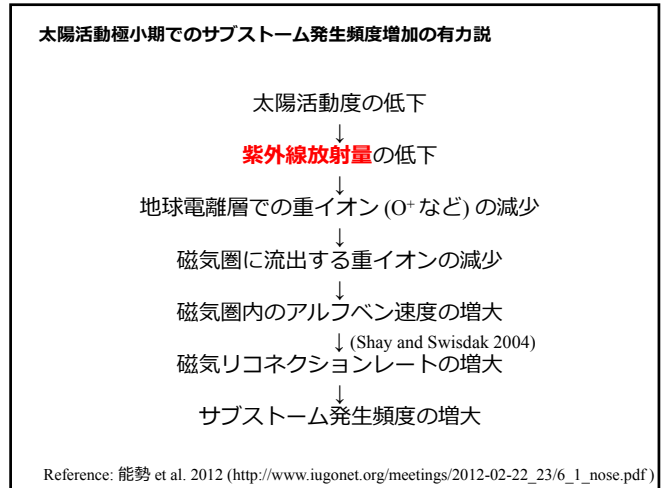
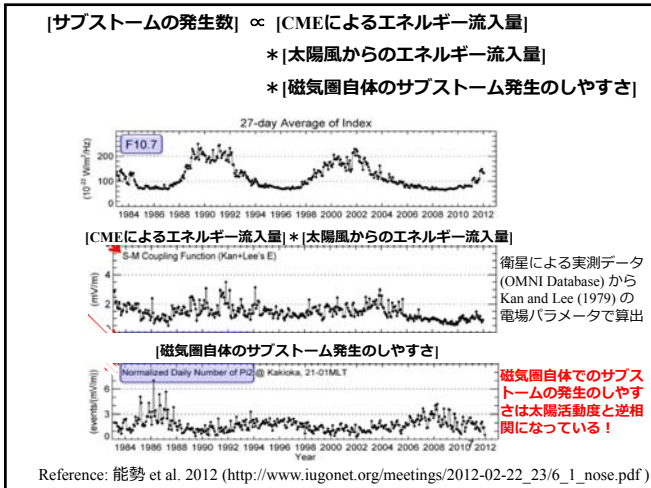


典型的事例：
オーロラ嵐・サブストーム発生に対する太陽活動の影響



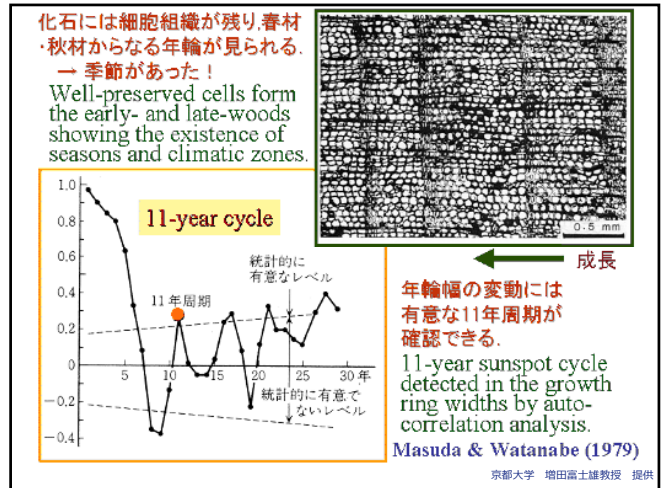
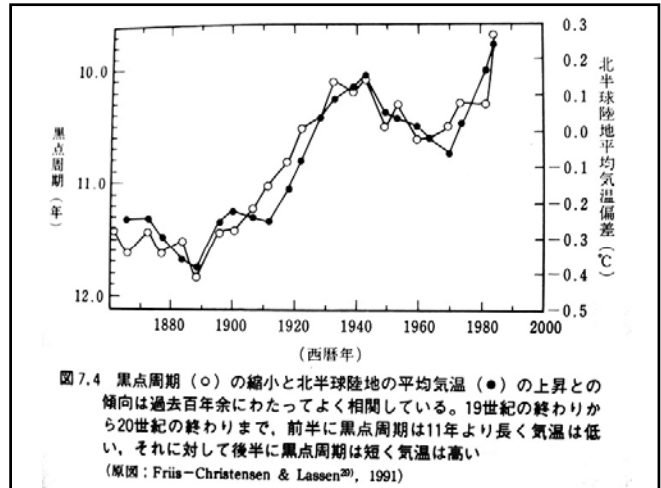
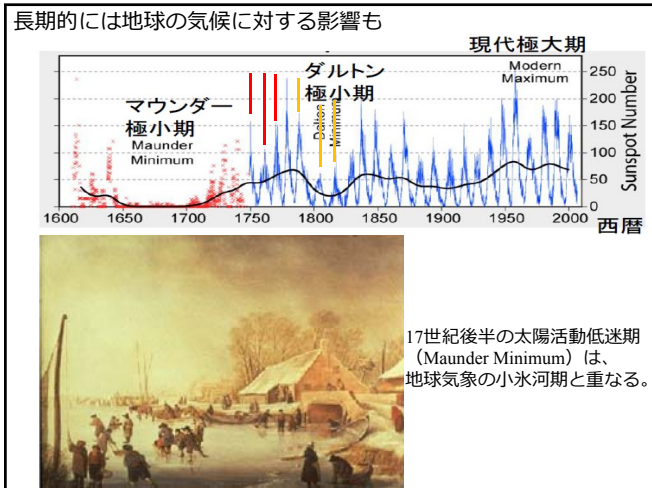
サブストーム発生数
(低緯度地磁気脈動(Pi2: 周期40—150s 減衰波=サブストーム発生指標)

Reference: 能勢 et al. 2012 (http://www.iugonet.org/meetings/2012-02-22_23/6_1_nose.pdf)



(5) 宇宙天気変動の地球気候や人類社会への影響

- 宇宙天気の影響
- (例)
- ・ 高層雲量の周期的変動
 - ・ 気温の周期的変動 (樹木の年輪)
 - ・ 海面温度の周期的変動
 - ・ 地層や氷河中の放射性同位体含有量の周期性
 - ・ 約20年周期の超高層大気の大気伝導度 (地磁気の日変動度) の変化と太陽紫外線量との関係(?)
 - ・ 太陽活動周期の長さの変動と陸上大気温度変動



太陽活動の地球気候への影響のプロセス二大学説

◆紫外線の照射量の変動による気温への影響
太陽活動 極大期 ⇒ 紫外線 増
⇒ 超高層大気 of 温度 上昇
⇒ 下層大気 of 温度 上昇 (?)

◆宇宙線の流入量の変化による雲量への影響
太陽活動 極大期 ⇒ 宇宙線 減
⇒ 雲量 減 (?)
⇒ 気温 上昇

宇宙天気の現代社会への影響：

日常生活のほとんどにおいて、我々が宇宙天気を直接意識することは少ないかも知れないが、太陽からの宇宙環境への擾乱が大きくなった時、人類の科学技術には、宇宙空間、地上に関わらず影響を受けるものが多い。

宇宙空間：無数の人工衛星 (科学、気象、GPS、放送、携帯電話、偵察等々)、宇宙ステーション、スペースシャトルなどの宇宙船
地上：変電所、石油パイプライン、電離層を利用した無線通信 (ラジオ、TV、航空管制等々)

現代社会とそのインフラへの影響

石油パイプライン



電波通信



船舶無線・ナビゲーション



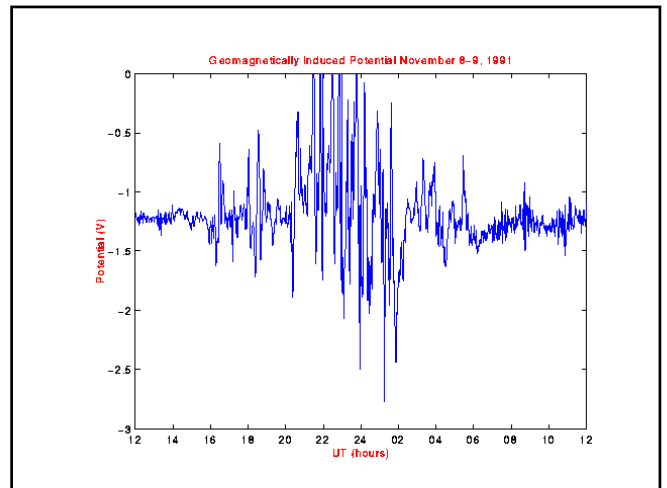
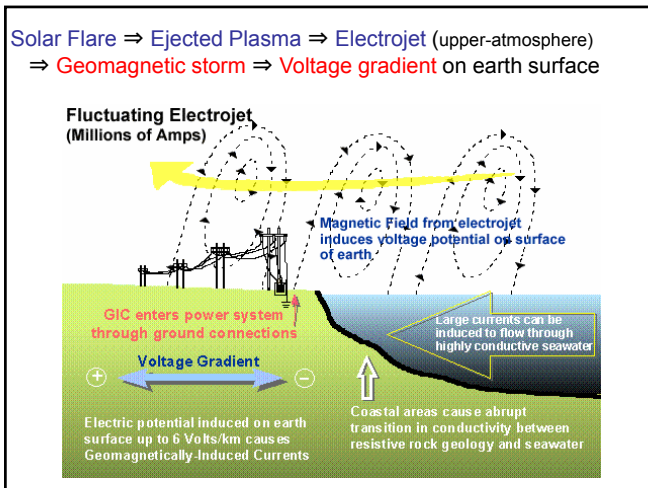

変電所の故障 (1983年3月)



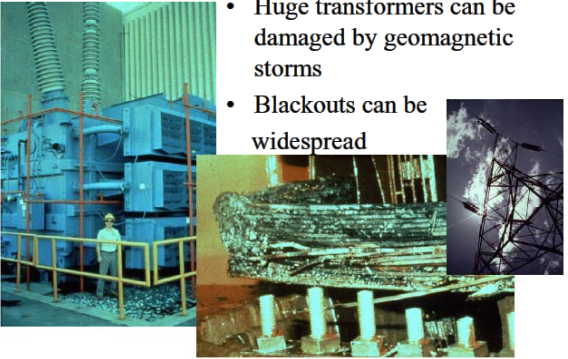
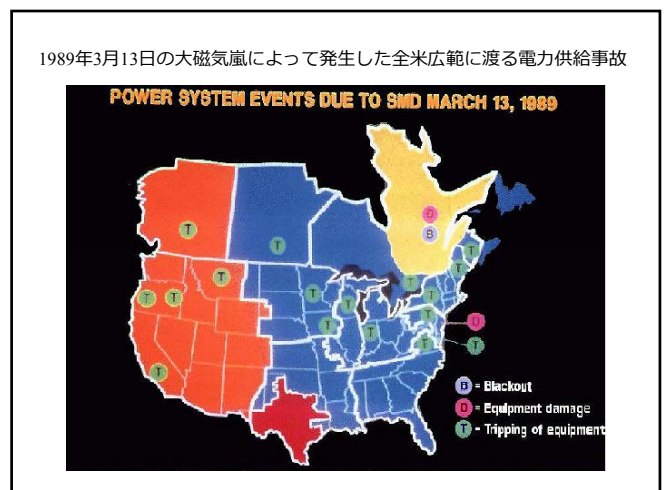
太陽の「嵐」、地球直撃

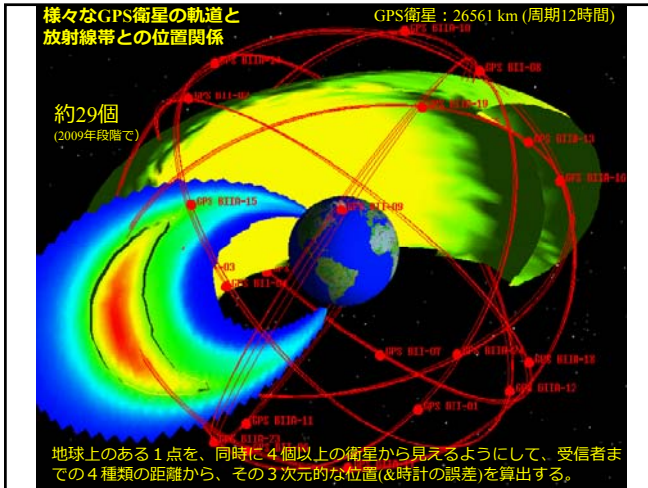
14年ぶり 微粒子、磁場乱す

テキサスでオーロラ

- Huge transformers can be damaged by geomagnetic storms
- Blackouts can be widespread



電波伝播経路の特性変動による誤差

GPS衛星からGPS受信機まで電波が達する経路では、電離圏や対流圏での電波特性の変化により、若干の電波伝播速度の遅延が生じる場合がある。これによって、計算で定めたはずの空間上の一点の信頼性が損なわれる。

一般的に受信機からみてGPS衛星が低仰角の場合、この誤差は増加する傾向がある。これは大気中を電波が伝播するときの遅延による影響が、高仰角(薄い大気を通過する)よりも低仰角(厚い大気を通過する)で大きいからである。またそもそも低仰角衛星からの信号は減衰が大きい。

ディファレンシャルGPS、Differential GPS、DGPS

このための補正手段として、正確な時計をもち座標のわかっている固定局を設置し、GPS受信データから計算した位置と固定局の位置の差から、精度を上げるなどの仕組み(ディファレンシャルGPS、Differential GPS、DGPS)の開発が行なわれてきている。

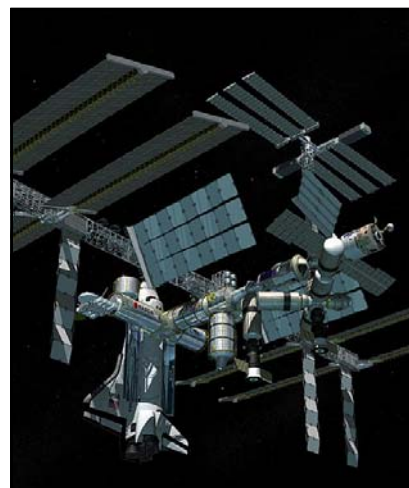
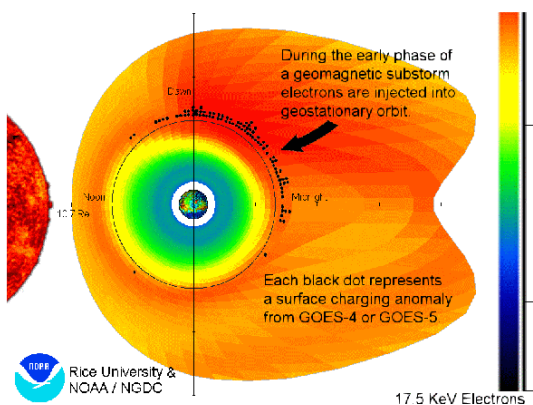
DGPSの補正信号は、かつてFM放送の利用されていない帯域で送信するシステム(JFN系列の放送局で実施)があり、カーナビなどでの利用には有用であった(1997年5月~2008年3月)。

また、WAASやMSAS(MTSATを利用した日本の運用)では、静止軌道の衛星からDGPSの補正信号を各受信機に送信している(WAAS/MSAS静止衛星自体もGPS衛星同様、測位にも使われる)。

人工衛星を利用した携帯電話サービス

- ・インマルサット(KDDIなど、静止軌道衛星 35786km 4個)
- ・ワイドスター (NTT Docomo、静止軌道衛星 2個)
 - 日本国内で最も普及(?)
 - フェリー、航空機、高山地域などの公衆電話、孤島地域 など。
 - 大規模災害時の公共用回線として多くの公共機関にも設置される
- ・Thuraya (アラブ首長国連邦所有の3台の静止軌道衛星)
- ・A C e S (エイセス; 東南アジア向け静止軌道衛星)
- ・I C O (高度10390kmの衛星10個使用)
- ・グローバルスター (高度1400kmの衛星48個使用)
- ・イリジウム(KDDI系、高度780kmの66個の衛星を使用)
- ・テレデシック(マイクロソフト系、288個もの衛星を使用) (インターネット)

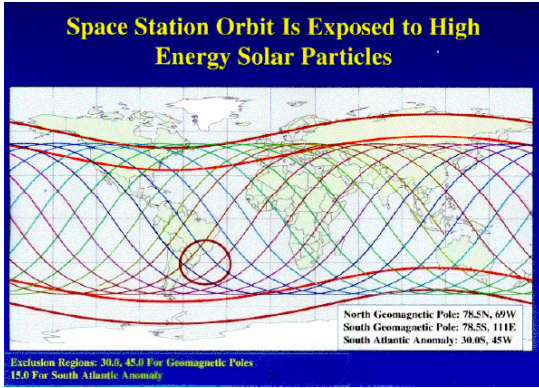
磁気嵐時の電子の流入による人工衛星表面の異常帯電現象



国際宇宙ステーション (ISS)

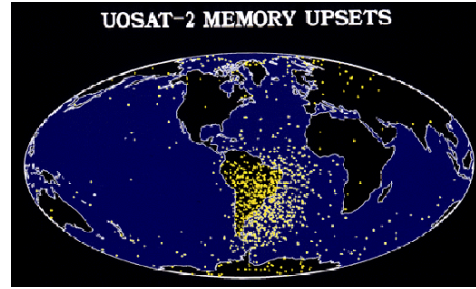
アメリカ、ロシア、日本、カナダ、ESA
地上約400km、周期約90分

国際宇宙ステーション(ISS)の軌道と放射線帯通過位置



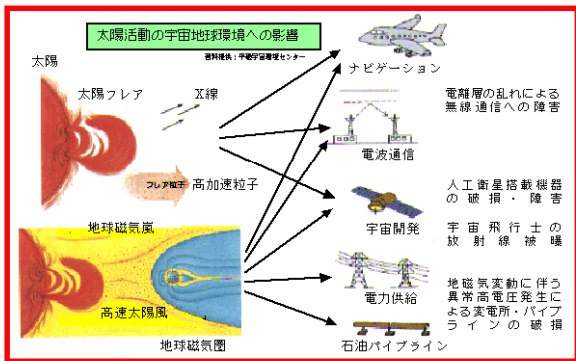
この間は、宇宙飛行士への放射能被曝の危険性も高まる。

低軌道衛星のメモリーエラーが発生した地点の分布図



低軌道衛星の軌道面と放射線帯 (Van Allen 帯) が南米上空で交差している。

人類社会への影響のまとめの図



アメリカ海洋大気圏局による宇宙天気警報



NOAA Space Weather Scales

Category	Effects
Geomagnetic Storms G1-G5	Satellites, Power Grids, other
Solar Radiation Storms S1-S5	Biological, Satellites, other
Radio Blackouts R1-R5	Navigation, Radio

- Easy way to communicate conditions and forecasts
- Like the hurricane or earthquake scales
- Will be hearing these, seeing them in the news

(6) 京都大学・理・附属天文台での地上光学観測

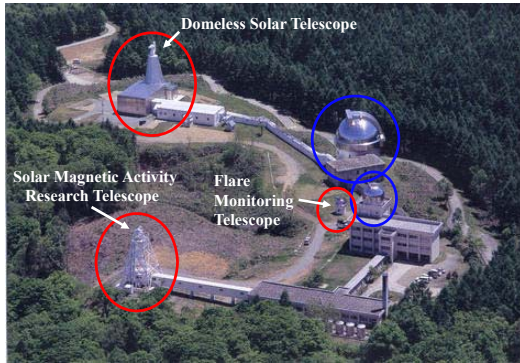
■ 太陽観測の宇宙天気研究における役割 ■

太陽面上での個々の爆発現象・衝撃波等の規模・速度・方向性・磁場の構造 など 様々なパラメータの把握

太陽面上構造物の現状から将来の活動状態を予測するための統計的确实性を高めるサンプルデータの蓄積

このような太陽の活動の起動力となるメカニズム自体の解明
 ☉太陽内部からコロナに至るまでの運動状態・物理量の測定

*京都大学飛騨天文台の太陽望遠鏡

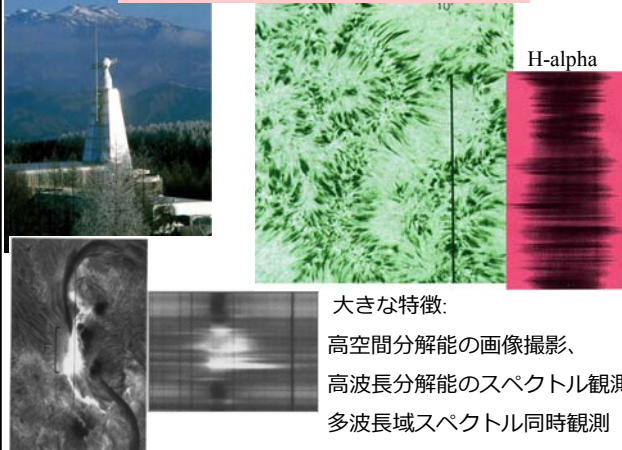


Hida observatory

宇宙天気研究における太陽観測の二つの相補的なアプローチ

- ◆ 微視的太陽観測 Microscopic Observation
Detailed observations of solar events with high-resolution imaging and spectrum-measurement
=> Domeless Solar Telescope (DST)
- ◆ 巨視的太陽観測 Macroscopic Observation
The solar full-disk observations
=> Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART)
=> Flare Monitoring Telescope (FMT)

The Domeless Solar Telescope (DST)



大きな特徴:
高空間分解能の画像撮影、
高波長分解能のスペクトル観測、
多波長域スペクトル同時観測

The Domeless Solar Telescope (DST)

From imaging data

■ Velocity field of photospheric gas motion

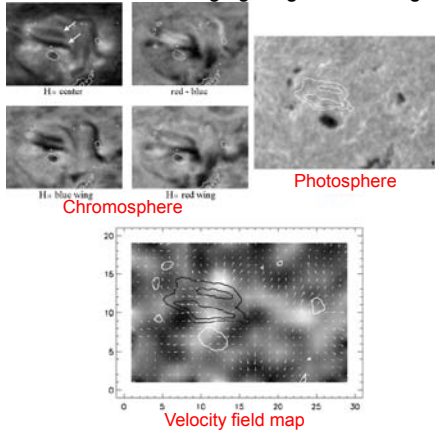
T. Magara and R. Kitai ApJ, 524, 469, 1999
S. UeNo et al. AdSpR, 26, 1793, 2000
H. Kozu et al. PASJ, 2005, 2006 etc.

Investigations of relationship between velocity fields of photospheric gas and spatial distribution or time-evolutions of magnetic structures.



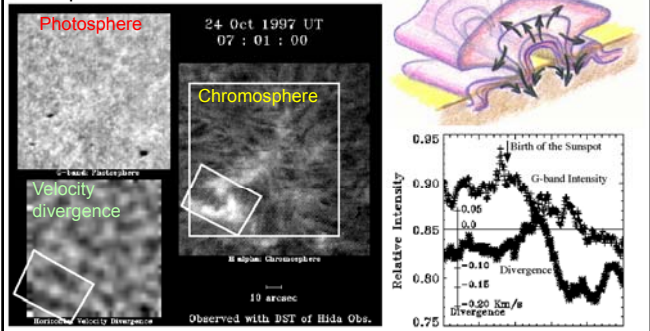
The Domeless Solar Telescope (DST)

Characteristics of the emerging magnetic flux region



The Domeless Solar Telescope (DST)

Sunspot formation



Strong down flow in the chromosphere
=> Gradual velocity convergence on the photosphere
=> Intensity darkening of the photosphere (Birth of the spot)
=> Rapid velocity convergence

The Domeless Solar Telescope (DST)

This spectro-heliograph can obtain **4-dimensional data**:

- 2D spacial distribution
- wavelength information (physical values along the height)
- time evolution



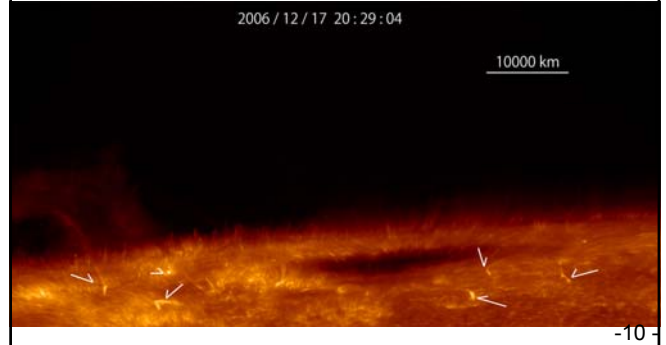
We can investigate **3D chromospheric structures** and **evolutions** of **solar active phenomena** like jets and **sources** of the high-speed & low-speed solar wind.

-13-

The Domeless Solar Telescope (DST)

From spectroscopic data

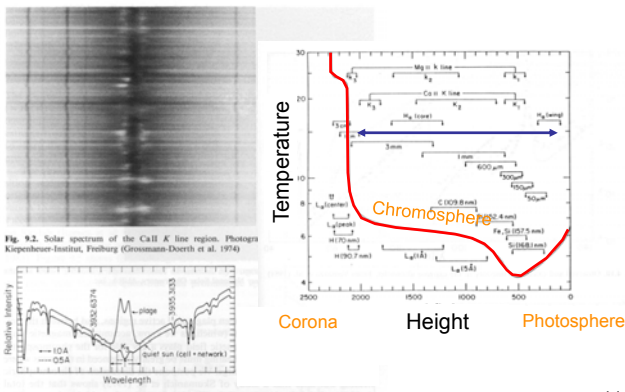
The Ca II H filtergraph of the HINODE/SOT has revealed various chromospheric activities in detail.



-10-

The Domeless Solar Telescope (DST)

Spectroscopy at Ca II K, H Line

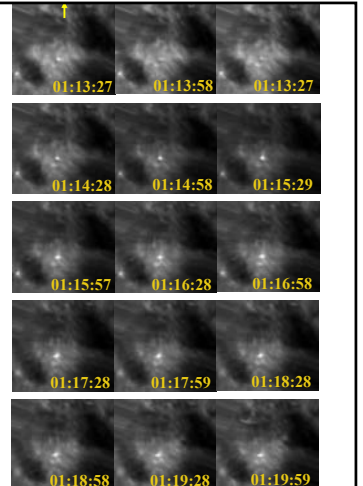
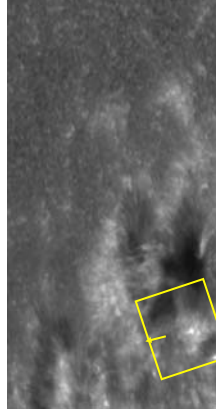


-11-

ジェットの典型例1

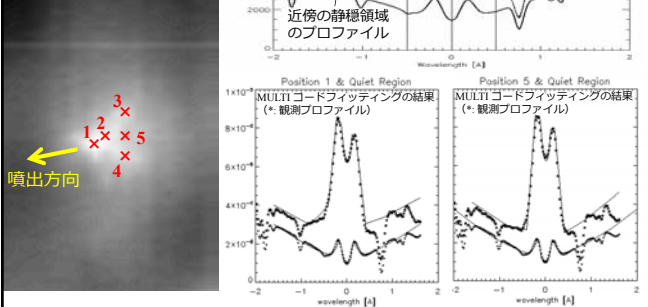
2007-06-03 01:15:57 UT

HINODE/SOT Ca II H

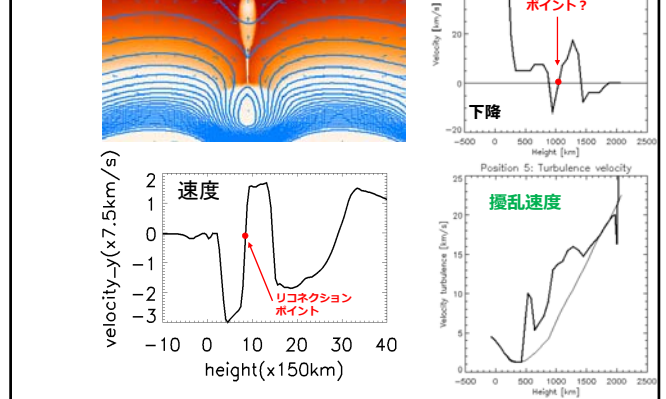


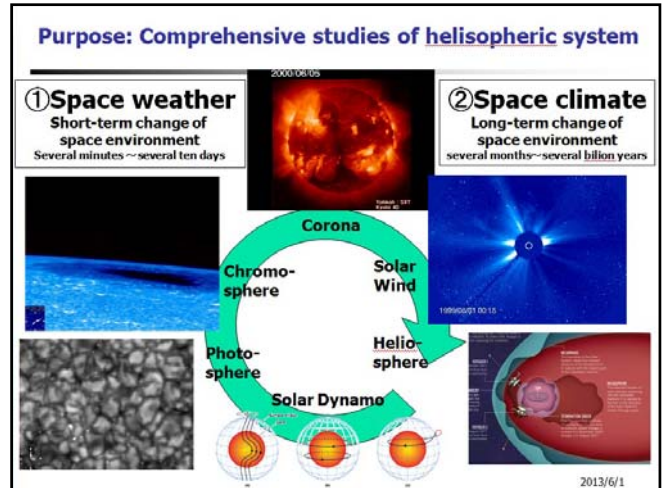
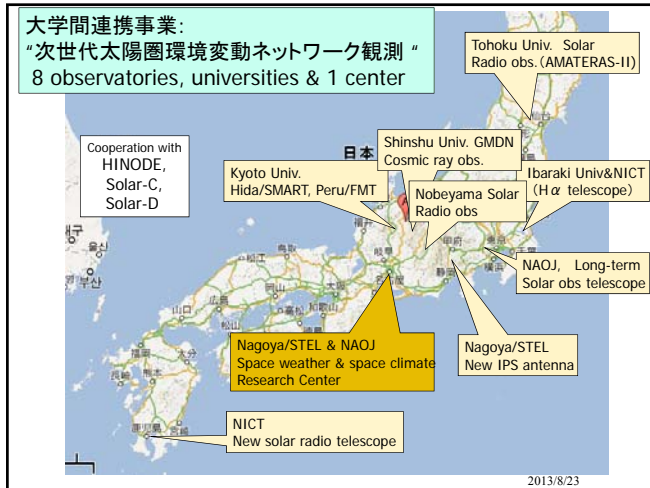
黒点近傍ジェットの吸収線プロファイルと大気モデルフィッティング (MULTI Code) の結果

ヘリオグラム中のジェットの拡大
FOV: 8530x10700 km



黒点近傍の静的なジェットのシミュレーション (中村他) の推定された構造





他機関との役割分担

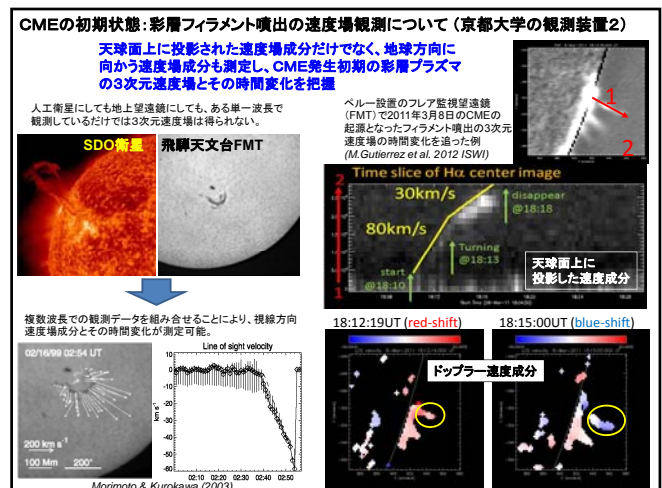
- 1) フィラメント噴出・CMEの物理量の把握**
本体形状、衝撃波面、3次元速度場、密度分布、磁場構造、...
三鷹 Solar Flare Telescope (彩層多波長、磁場) 太陽周期活動望遠鏡 (彩層磁場: 長期的) 飛騨SMART (彩層多波長、彩層磁場: 短期的、FMT (彩層多波長) 名大 IPS (惑星間空間CME分布、速度場) 東北大 IPRT など (衝撃波高度変化)
- 2) 太陽風速度・密度の3次元分布の把握**
高速領域と低速領域の3次元分布 & 時間変動、CIR 衝撃波面の位置・強度 定在 IMF 構造
名大 IPS (太陽風速度分布) 三鷹 Solar Flare Telescope、周期活動望遠鏡 (光球・彩層磁場分布) 飛騨SMART (彩層磁場分布)
- 3) 紫外線を中心とする電磁波の放射量変動の把握**
紫外線放射量に大きく影響する彩層の輝度・温度分布 紫外域の波長帯別放射量推定
三鷹 Solar Flare Telescope、周期活動望遠鏡 (彩層H-alpha多波長画像) 飛騨SMART, FMT (彩層H-alpha, Ca II 多波長画像) 九大全面望遠鏡 (彩層 Ca II K 画像)

京大太陽面爆発監視システム
目的

- 噴出に至るフィラメントの磁場構造の把握
→ フィラメント噴出の予測とCME (Flux Rope) 磁場構造の推定
- 噴出しているフィラメントの3次元速度場の把握
→ 噴出メカニズムの解明とCME (Flux Rope) の地球磁気圏到達可能性の予測
- 彩層画像データによる紫外線放射量の推定
→ 太陽活動長期変動と地球環境変動との比較 (1900年代前~中期のアナログデータとの連結)

京大太陽面爆発監視システム (装置の特徴)

- 1) カルシウム線フィラメント磁場・彩層輝度観測装置**
Call 8542 Å 線で偏光観測を 10^{-4} の測定精度で行ない、フィラメント磁場の直接的導出 および彩層全面輝度分布モニターを行なう。
時間分解能 : 約30秒
磁場導出精度 : 数G
空間分解能 : 1秒角/画素
飛騨天文台SMART望遠鏡に新規搭載予定
- 2) H-alpha線 フィラメント噴出3次元速度場観測装置**
飛騨天文台SMART望遠鏡・全面H-alpha撮像装置の改修 (高速チューナブルフィルタによる分光撮像装置化)
波長サンプリング: $\pm 4.0 \text{ \AA}$ (約180km/s)間を41点で
時間分解能 : 約20秒
ペルー-FMT望遠鏡フィルタ追加
波長サンプリング: 3波長→5波長
波長範囲 : $\pm 0.8 \text{ \AA}$ → $\pm 3.0 \text{ \AA}$ (約140km/s)
フィラメント噴出の24時間連続監視
→ 速度ダイナミックレンジの向上
ペルー-FMT望遠鏡



噴出する彩層フィラメント中の磁場構造の測定について：(京大大学の観測装置1)

磁場に感度のある彩層形成線の太陽全面高時間分解能偏光観測を行ない、CME発生初期の彩層プラズマ中の磁場構造とその詳細な時間変化を把握

Solar-C衛星においても、彩層磁場の観測が計画されているが、中規模フィラメント1本をカバーできる視野に限られるので、複数活動性フィラメントとその変化の様子を漏らすことなく捉えるためには、地上からの全面観測を併行して行う必要がある。

飛騨天文台 SMART/T2
Call 8542 Å 線で彩層フィラメントの偏光観測を 10^{-4} の測定精度で行ない、時間分解能約30秒で数Gの精度での噴出フィラメント磁場の直接的導出を行なう。
→ フィラメント噴出メカニズム解明、蓄積エネルギーの定量モニターによる噴出予測、噴出フィラメントの磁場構造測定による磁気圏への影響の予測

光球磁場からもダークフィラメント領域の磁場構造は推定できるが、by using Han He's Nonlinear force-free magnetic field extrapolation scheme

当計画では、京大飛騨天文台SMART望遠鏡の太陽全面磁場偏光観測望遠鏡(T2)に、高速脱出し(毎秒100フレーム)が可能なCMOSカメラの導入、高速連続回転が可能な波長板回転装置の導入、高速波長可変フィルタの導入、シーケンシングによる画像逐々のソフト的補償、などの改良を加えることにより観測に用いる。

Ca II 8542 Å 線の彩層磁場偏光の特徴については、京大飛騨天文台DST分光器を用いて、現在研究進行中 (Anan et al. 2012 SPIE)

ロードマップ(京大太陽面爆発監視システム)

	第一年度	第二年度	第三年度	第四年度	第五年度
	2014	2015	2016	2017	2018
カルシウム線(8542 Å)彩層全面輝度・磁場観測装置	カルシウム線磁場偏光メカニズムの研究	新フィルタ開発	CMOSカメラ、高速回転波長板の導入	制御システムの新システムへの搭載	新システムによる観測
H α 線彩層全面多波長観測ネットワーク	飛騨SMART旧システムによる観測・データ蓄積	CMOSカメラ搭載	フィルタ改修&搭載	新システムによる観測	
観測装置整備以外の項目	メタデータ整備によるデータ共有化、データ蓄積装置の拡充と観測制御システム維持、国際共同研究の推進 (特定助教、PDF研究員と技術補佐員の雇用、関係各国との間の人的交流)				

飛騨天文台 フレア監視望遠鏡 Flare Monitor Telescope (FMT)

太陽地球系エネルギー国際協同研究: Solar Terrestrial Energy Program (STEP) 1990-1997 に参画するため1991年度に建設された5種類の太陽画像の同時観測望遠鏡

H α 線中心 全面像

プロミネンスモード

FMT Data を用いた研究例

フィラメント噴出現象のベクトル速度場の導出とそれらとコロナ質量放出(CME)との関係についての研究
=> T. Morimoto & H. Kurokawa (PASJ, 55, 505, 2003)

フレアに伴う彩層中の衝撃波 (Moreton Wave) の検出
=> N. Narukage et al. (ApJ, 572, L109, 2002)
Eto et al.

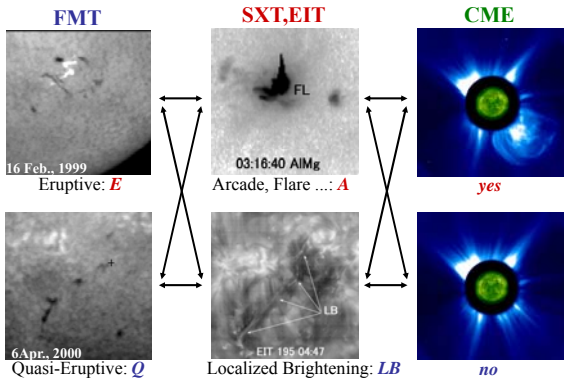
噴出フィラメントの3次元速度場の測定

天球面上の速度場成分

フィラメント中心の視線方向速度の時間変化

Morimoto & Kurokawa(2003 PASJ)

They distinguished whether each active filament really erupted or not by analyzing its time-variation of the radial upward velocity, and investigated the relation with coronal structure and CME.



As the result, all really erupting filaments correspond to appearances of "coronal arcade structures" and "CMEs".

No.	Time	Location/NOAA	Type (?)	SXT	EIT	GOES (min)	CME
1	11/05/92 00:15-02:15	S20W17/.....	E (43)	A		-	
26	10/27/98 23:34-36:39	N18E40/S369	Q (0)	-	LB	C1.6	no
27	01/30/99 00:00-01:50	S34E20	E (84)	A		B3.3	
28	02/09/99 03:07-05:22	S27W39/S453	E (13)	A	A/EW/D [†]	C2.3	yes
29	02/16/99 01:42-04:15	S27W18/S458	E (53)	A		M3.2	
30	06/01/99 06:29-07:08	S23E17/S557	Q (0)	LB		C6.2	no
31	01/19/00 00:28-01:47	N08W18/S829	E (36)	A	A/D	C1.4	yes
32	01/28/00 05:35-06:20	S28W20/S841	Q (0)	LB	LB	B4.4	no
33	04/06/00 03:48-05:48	S27W02/	Q (0)	LB		C1.4	no
34	04/25/00 01:05-01:47	N23W27/S972	E (51)	A	A/FE	C1.1	yes
35	05/08/00 04:19-07:40	S21W03	E (45)	A	A/FE/D	B6.8	yes

DB Type vs. Coronal Signature

DB type	A	LB	Total
Eruptive	22 (71%)	0 (0%)	22
Quasi-eruptive	1 (3%)	8 (26%)	9
	23	8	31

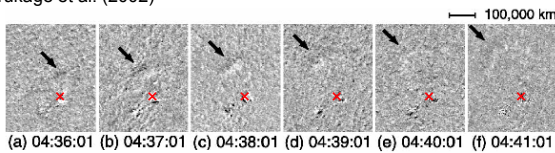
DB Type vs. CME Association

DB type (SXT & EIT)	yes	no	Total
Eruptive(A)	8 (53%)	0 (0%)	8
Quasi-eruptive(LB)	0 (0%)	7 (47%)	7
	8	7	15

Morimoto & Kurokawa (2003: PASJ)

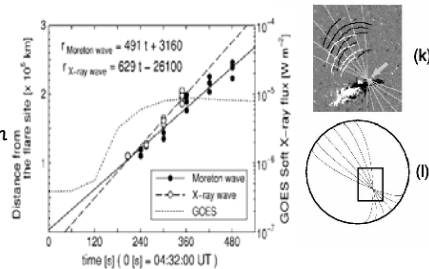
彩層で見える衝撃波の構造・特徴の研究

N. Narukage et al. (2002)



世界中で過去に検出された彩層の衝撃波伝播現象のうち、半数以上のものは、当天文台のFMTという望遠鏡が発見したことになる。

人工衛星によりX線で検出された、コロナ中の衝撃波との比較解析により、それらが太陽フレアにより発生した同一衝撃波の異なる高さの波面を表しているであろうことが明らかとなった。

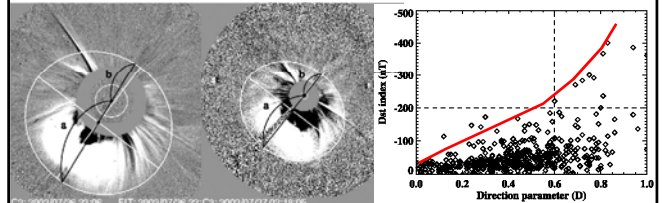


The Flare Monitoring Telescope (FMT)

As for the correlation between "the velocity strength and direction of the eruption" and "the strength of geoeffectiveness"

R.S. Kim et al. ApJ, 677, 1378 (2008 Apr.20)

"CME Earthward Direction as an Important Geoeffectiveness Indicator"



LASCOC2 (left) and C3 (right) images to illustrate how to estimate the direction parameter. The ratio of the shorter (b) to longer (a) distance of the CME front measured from the solar center along the line (b/a) is defined as the direction parameter, D. Note that the line passes both through the centers of the ellipse and the Sun.

Direction parameter vs. Dst index for 486 frontside halo CMEs. The horizontal dashed line represents Dst = -200 nT, and the vertical dashed line indicates D=0.6.

-37-

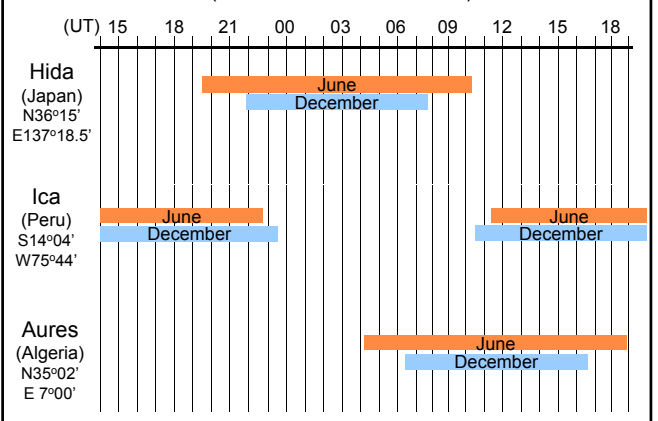
Continuous H-alpha Imaging Network (CHAIN)



アルジェリア — 日本 (飛騨天文台) — ペルー

Daytime Period at Each Site

(between sunrise & sunset)



Plan of the FMT in PERU as a part of CHAIN-project

The 1st oversea FMT will be installed in Peru.

We visited candidate sites for installing the FMT in Peru in Jan. 2007. Then, we selected the campus of the National Ica Univ. as the best site.

National Ica University
 Latitude : - 15°
 Altitude : 400 m
 Rain : 0 mm/year
 Temperature : 10 - 27 °C
 Avg. Humidity : 20 %

LIMA ICA

ISWI Activities

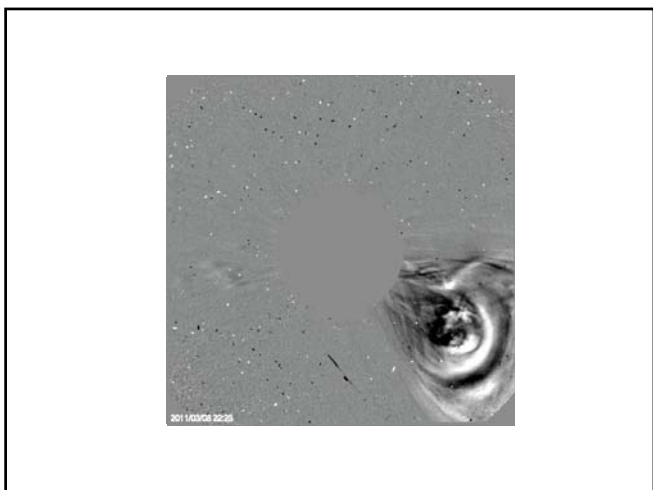
March 18th 2010:
 Installation of the FMT in the Solar Station (ESI) of ICA Univ. was completed.

ペルー移設後に観測された太陽活動現象例

EVENT M4.4
 (2011-03-08)
 Observed by FMT-ESI

AIA 94 ~5MK

By Maria Victoria Gutierrez Escate



Transverse velocity

Goes X-ray light curve

30km/s
80km/s

Filament change transverse velocity Around 18:13

Chromospheric filament disappeared & coronal loop's expansion accelerated.

After collision, something propagate to higher atmosphere


さらに、

- ・ 太陽フレア爆発の位置、大きさやタイミング
- ・ 噴出フィラメントの地磁気への影響の大きさ

の、より正確な予測をするためには、太陽面での爆発や噴出付近の、**磁場ベクトルの分布構造**の情報が不可欠となる。

【太陽磁場活動望遠鏡 (SMART)】

設置場所：京都大学飛騨天文台

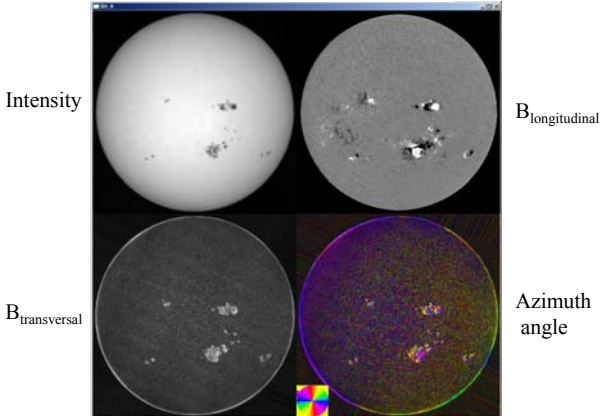


目標

- ・噴出フィラメントが含んでいる磁場の構造を把握する。
- ・太陽フレアの発生予測に必要な条件を観測的に実証する。

連続光画像とベクトル磁場3成分マップ

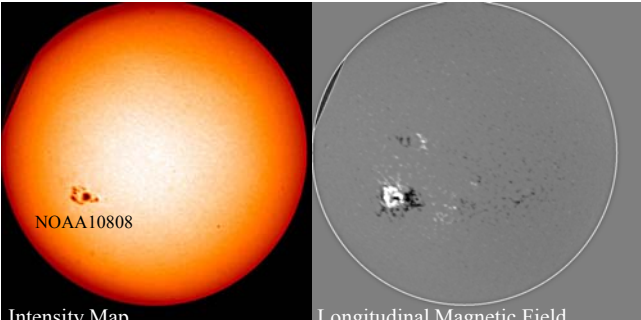
2003. 10. 30 02:19 UT



Intensity $B_{\text{longitudinal}}$

$B_{\text{transversal}}$ Azimuth angle

磁場データの解析例

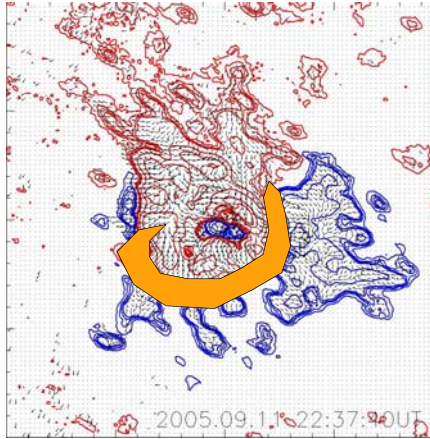


NOAA10808

Intensity Map Longitudinal Magnetic Field

2005. 09. 11 22:34:40 UT

磁場マップの黒点領域だけを切り出した拡大図



Contour:
 $\pm 1300, \pm 1000, \pm 500,$
 $\pm 250, \pm 100, \pm 80,$
 $\pm 60, \pm 35 \text{ G}$

2005.09.11 22:37:00 UT

Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART)

Investigation of necessary conditions for solar flare occurrence

Some Indices are compared with chromospheric brightness

Example of the index:
 Distance from the chirality inversion line of the Twist α

Magnetic Twist α which are weighted by field strength:

Generally, $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha(x, y)\mathbf{B}$ (Force-free field equation)

$$J_z(x, y) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB_y}{dx} - \frac{dB_x}{dy} \right) \text{ Vertical current density}$$

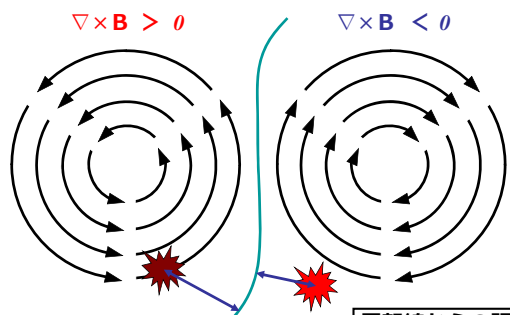
$$\alpha_z(x, y) = \mu_0 \frac{J_z(x, y)}{B_z(x, y)} \text{ Vertical Twist parameter}$$

In this study, $\alpha(x, y) = (|B_z(x, y)| / \Sigma |B_z|) \alpha_z(x, y)$

-23-

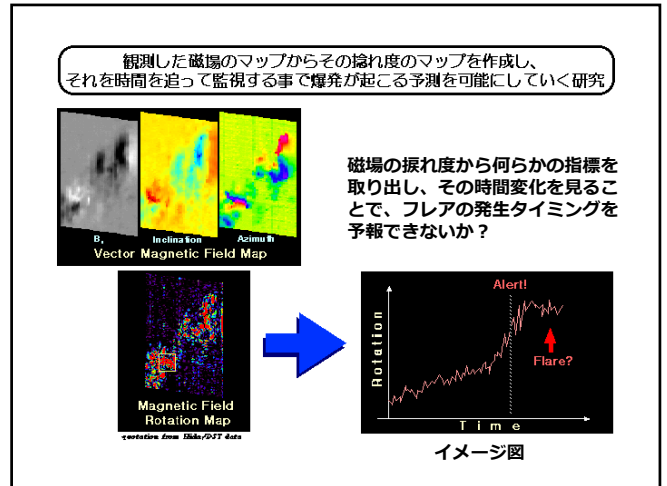
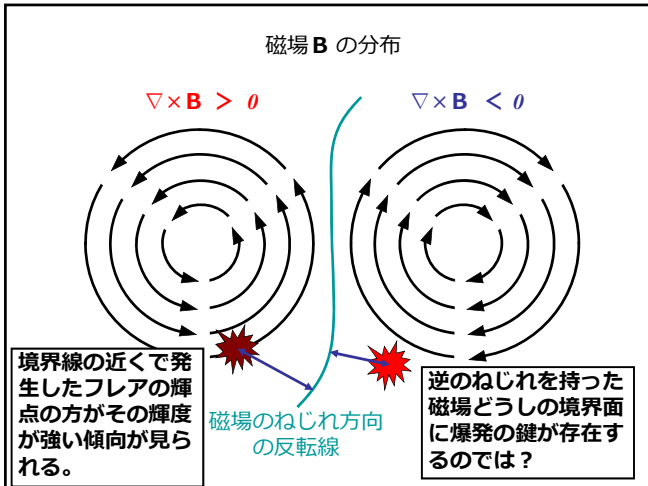
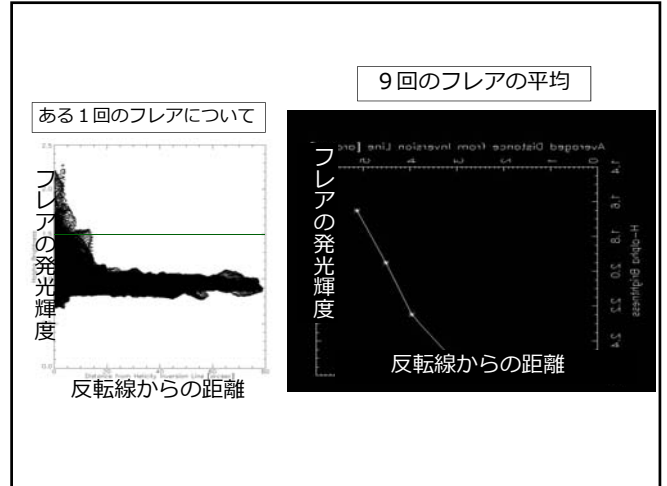
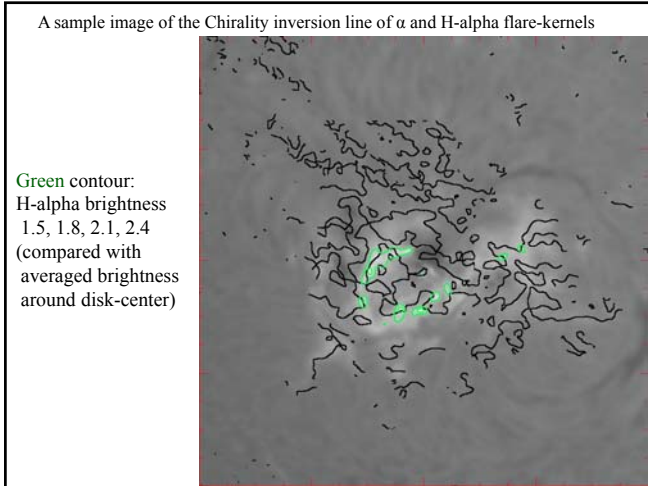
磁場 \mathbf{B} の分布

$\nabla \times \mathbf{B} > 0$ $\nabla \times \mathbf{B} < 0$



磁場のねじれ方向の反転線

反転線からの距離と発光輝度との関係を調査

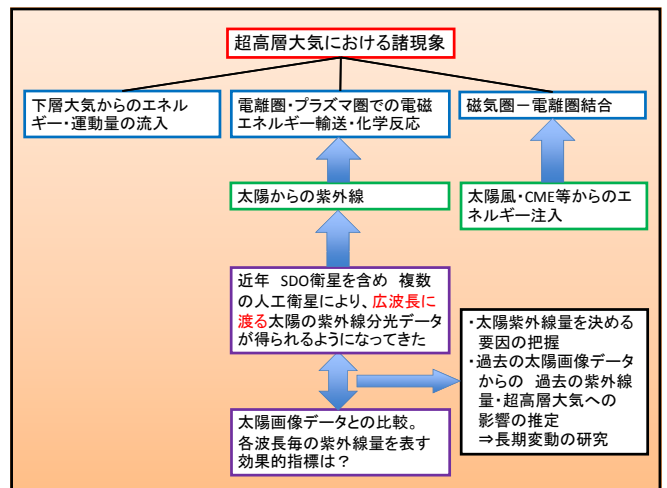


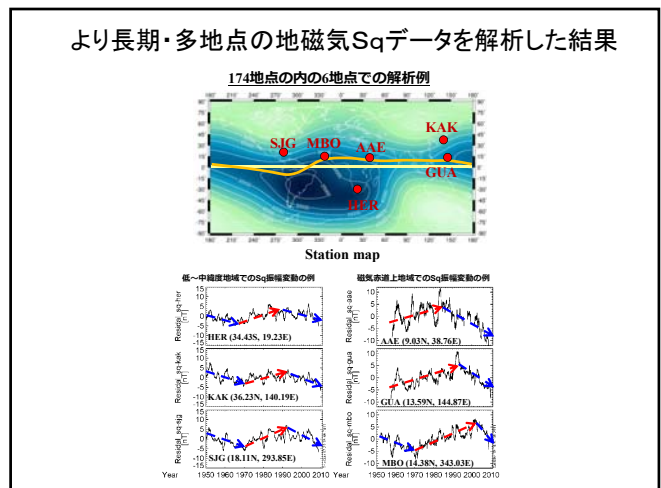
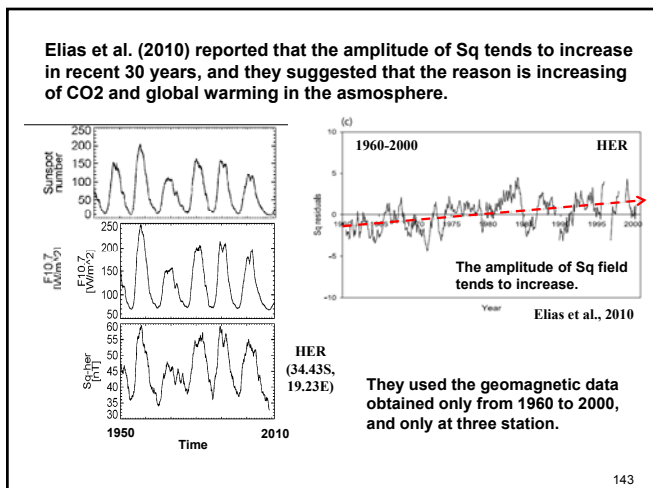
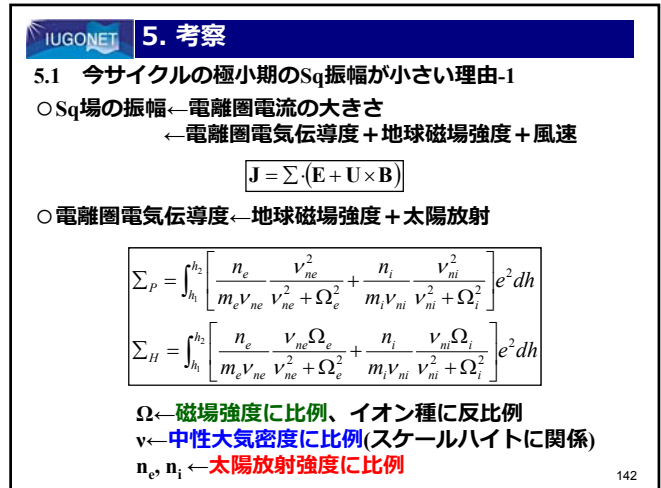
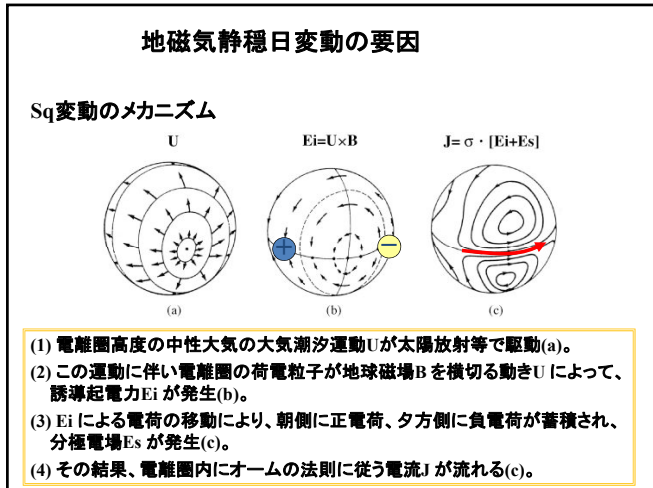
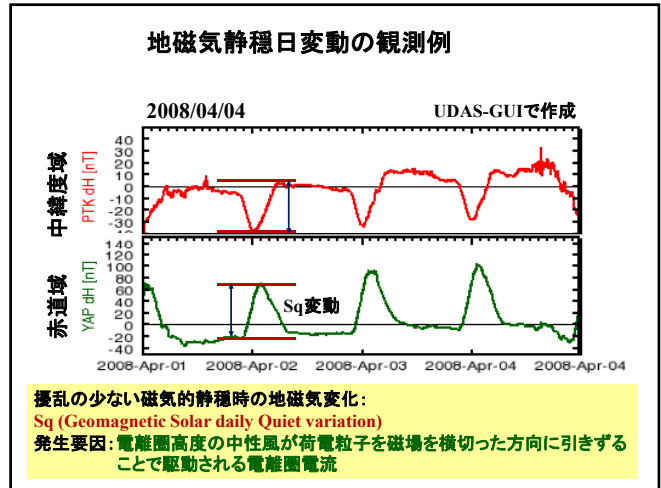
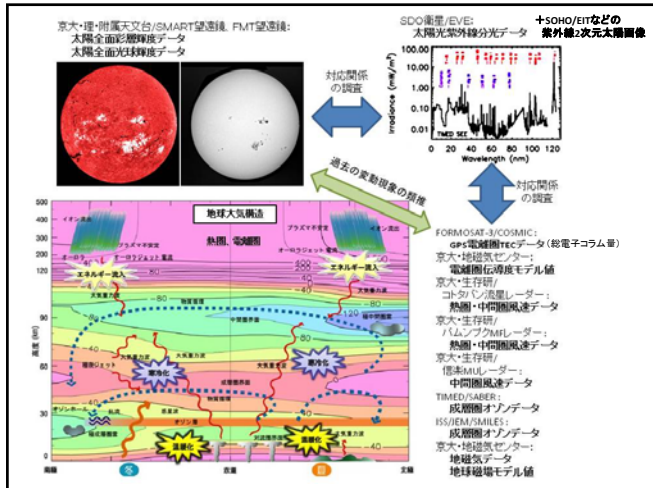
さらに長期的な地球環境・超高層大気の変動への影響についての研究も・・・

『太陽物理学との連携による超高層大気変動現象の研究』

○上野悟(京大飛騨天文台)

新堀淳樹(京大生存研)、磯部洋明、浅井歩(京大宇宙ユニット)
横山正樹(和歌山大)、林寛生(京大生存研)





より長期・多地点の地磁気Sqデータを解析した結果

- 1) Sq変動振幅の単調増加現象は、もっと長期的なSq変動のごく一時期の傾向を見ているにすぎない。(地球全体のCO2の継続的増加に原因を押しつけるのは難しい。)
- 2) Sq変動振幅は、長期的に見ると、赤道地帯を除き、約20年毎に増加・減少のフェーズが転換しているようである。

【注意点】Sq変動振幅から太陽活動の成分を取り除く作業をする際、その指標として、現在太陽からのF10.7放射量変動データを用いている。

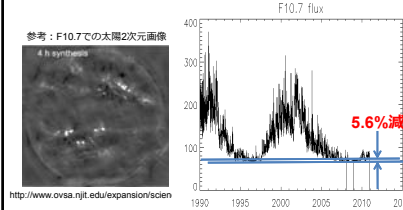
Sq振幅の長期的増減変動の2つの解釈

- A) F10.7放射量が超高層大気に影響を与えている紫外線を適格に反映していると仮定すると、超高層大気自体、もしくは中低層大気からの影響の過程の中に、20年毎の変動を生み出すメカニズムが存在している事を示している？
- B) F10.7放射量変動が、実際は超高層大気に直接的に影響を与えている紫外線波長域(50~150nm)の放射量変動と必ずしも一致しておらず、Sq変動の太陽活動周期性分を過小評価している？

太陽研究者サイドの課題

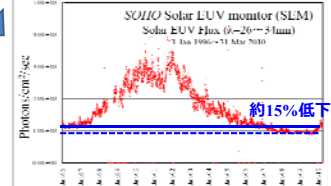
- 果たして電波領域のF10.7の放射量が、どれほど紫外線量を適格に反映しているのか？
F10.7変動の特徴と紫外線変動の特徴との違いは？
F10.7は紫外線のどの波長域の情報を一番良く反映しているのか？
- そもそも、今注目すべき紫外線放射量は、太陽面上のどのような構造・場所からの放射の影響を反映しているのか？
- F10.7以上に、超高層大気変動と高い相関性を持った長期的な紫外線指標は無いのか？
(勿論、現在は衛星による紫外線分光データを直接使用すれば良いが、装置・衛星毎の絶対値の誤差が思った以上に大きいので注意。さらに過去に遡って長期変動を調べる際には、より古くから存在する観測データから指標を取り出せるようにしておかなければならない。)

例えば、F10.7の前極小期と今極小期の相違は・・・

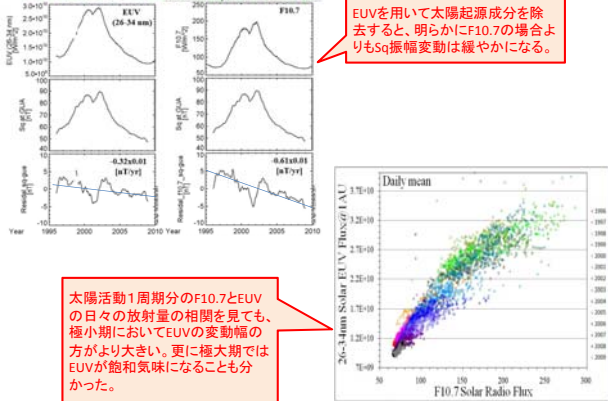


一方、Sq振幅は12.4%減

では、実際の紫外線放射量は？



F10.7とEUVフラックスを用いたSqトレンドの比較

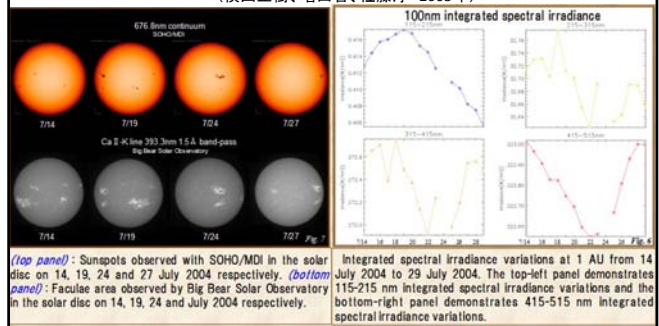


EUVを用いて太陽起源成分を除去すると、明らかにF10.7の場合よりもSq振幅変動は緩やかになる。

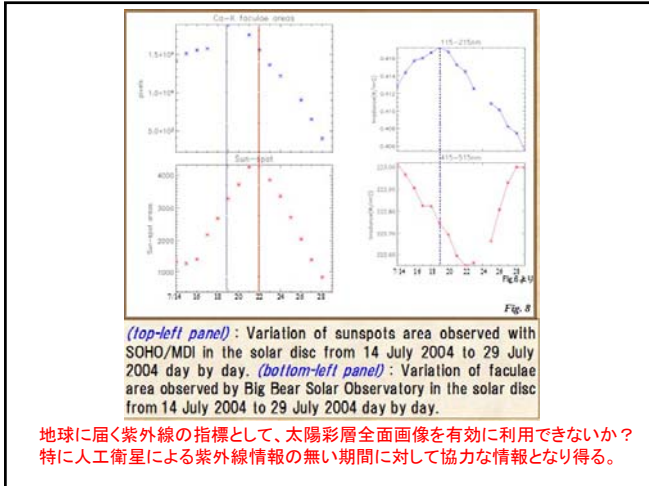
太陽活動1周期分のF10.7とEUVの日々の放射量の相関を見ても、極小期においてEUVの変動幅の方がより大きい。更に極大期ではEUVが飽和気味になることも分かった。

彩層全面画像データを用いた長期的な紫外線放射量指標導出の試み

太陽全面彩層情報と紫外線量との関係 (横山正樹、増田智、佐藤淳 2005年)



(top panel): Sunspots observed with SOHO/MDI in the solar disc on 14, 19, 24 and 27 July 2004 respectively. (bottom panel): Faculae area observed by Big Bear Solar Observatory 115-215 nm integrated spectral irradiance variations and the bottom-right panel demonstrates 415-515 nm integrated spectral irradiance variations.

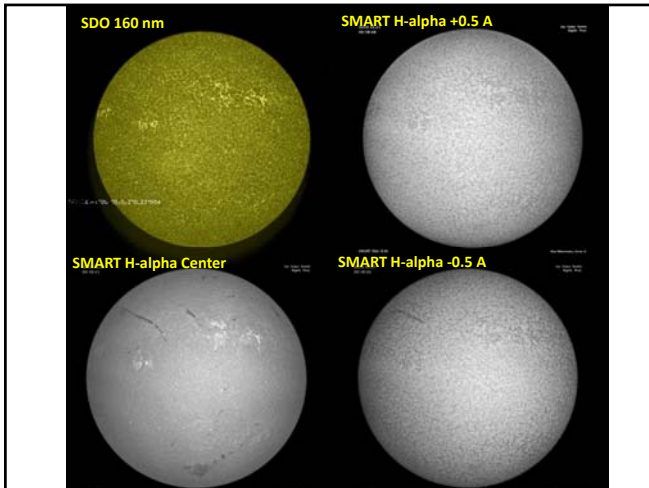


彩層全面観測@飛騨天文台 1991年～現在

SMART T1 images on 20101219

H-alpha - 0.8 A	H-alpha - 0.5 A	H-alpha center	H-alpha + 0.5 A	H-alpha + 0.8 A	H-alpha + 3.5 A
Download FITS file	Download FITS file	Download FITS file	Download FITS file	Download FITS file	Download FITS file
Download JPEG file	Download JPEG file	Download JPEG file	Download JPEG file	Download JPEG file	Download JPEG file

Additional images shown: FMT (Full-Merger Technique) images for H-alpha - 0.8 A, H-alpha + 0.8 A, H-alpha Line Center, and H-alpha Continuum. A photograph of the observatory telescope is also included.



By H. Watanabe et al.

Plage Index

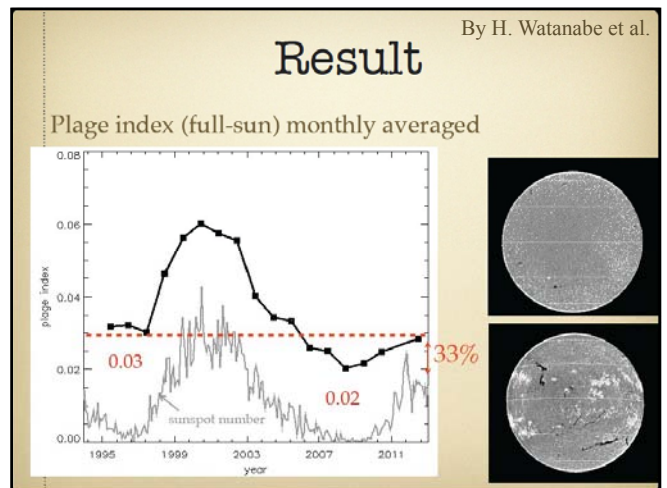
- Plage index : defined as the percentage of the area of the solar disk covered by plages + active network
 - Reproduction of the solar irradiance variation requires the contribution not only of active region plages but also of the enhanced network (Foukal et al. 2009).
- Intensity threshold method : pixels brighter than $\text{average} + 2\sigma$ (standard deviation)
- Plage brightness does not affect the plage contribution to irradiance variation (Worden et al. 1998)

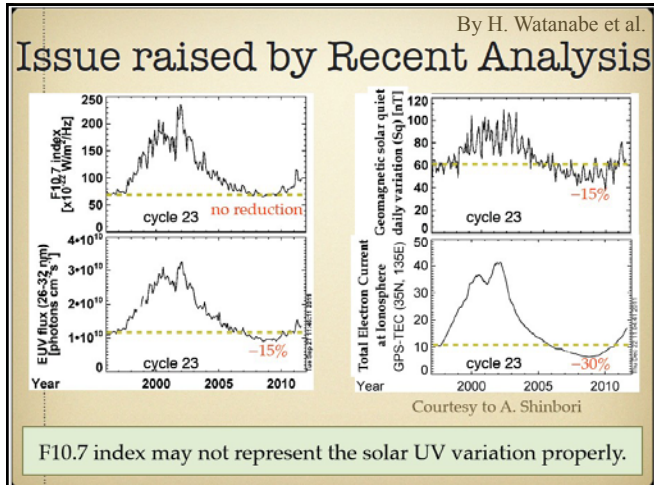
By H. Watanabe et al.

インデックスの定義

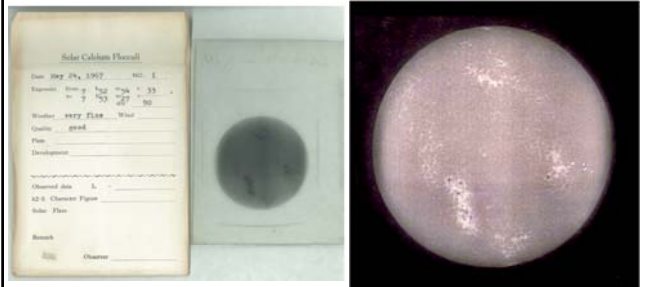
明るい側(plage index) ... (平均+ σ)以上のfrequencyの中間値
 暗い側(filament index) ... (平均- 2σ)以下のfrequencyの中間値

plage index = $1.2E-4$
 filament index = $2.9E-4$





最近、当天文台では、京大天文台にて1926～1929年、花山天文台にて1929～1941年、京大生駒山太陽観測所にて1941～1972年、の期間に各々観測されていた、46年間に渡るCaK II線での太陽全面像の写真乾板データが保管されていた事が分かり、デジタル化、データベース作成作業が始まりつつある。



今後は、このデータを用いて、この年代の太陽紫外線量と、超高層大気への影響の調査も進める。

参考文献

- ・ "THE SUN AND SPACE WEATHER"
by Arnold Hanslmeier (Kluwer Academic Publishers), 2002
- ・ 「宇宙と地球環境」 石田恵一 著 (成山堂書店) 2000年
- ・ 「総説 宇宙天気」 柴田一成、上出洋介 著
(京都大学学術出版会) 2011年
- ・ "Space Weather -- A Research Perspective --"
by the National Academy of Sciences, 1997
- ・ "Solar Physics and Terrestrial Effects"
by Roger P. Briggs, Robert J. Carlisle, Barbara B. Poppe
(Space Environment Center), 1996
- ・ NOAA Research Science Education HomePage,
Space Environment TOPICS on WEB by Space Environment Laboratory,
NOAA <http://www.sec.noaa.gov/>