

宇宙天気三二講座（電離圏編）

情報通信研究機構 電磁波研究所

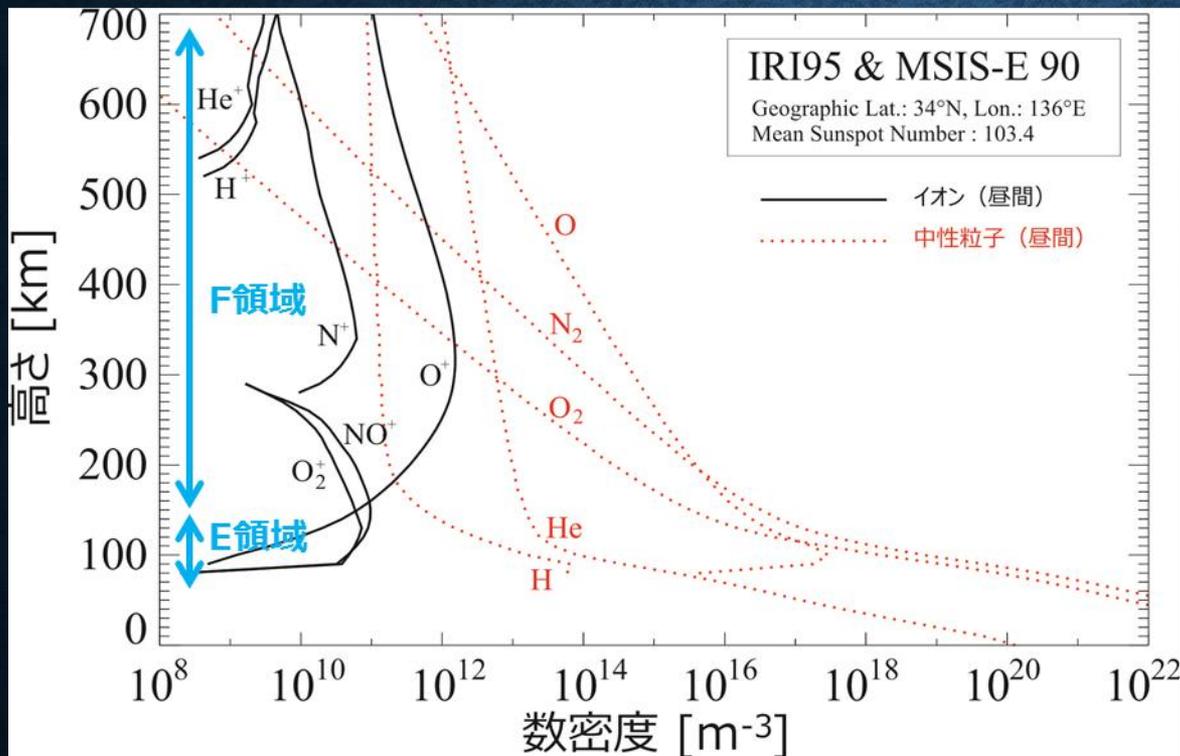
宇宙環境研究室 陣 英克



内容

- 電離圏の基本的な性質
- 電波の伝搬の仕方と電離圏の関わり
- 各電離圏現象がどこでいつ発生するか

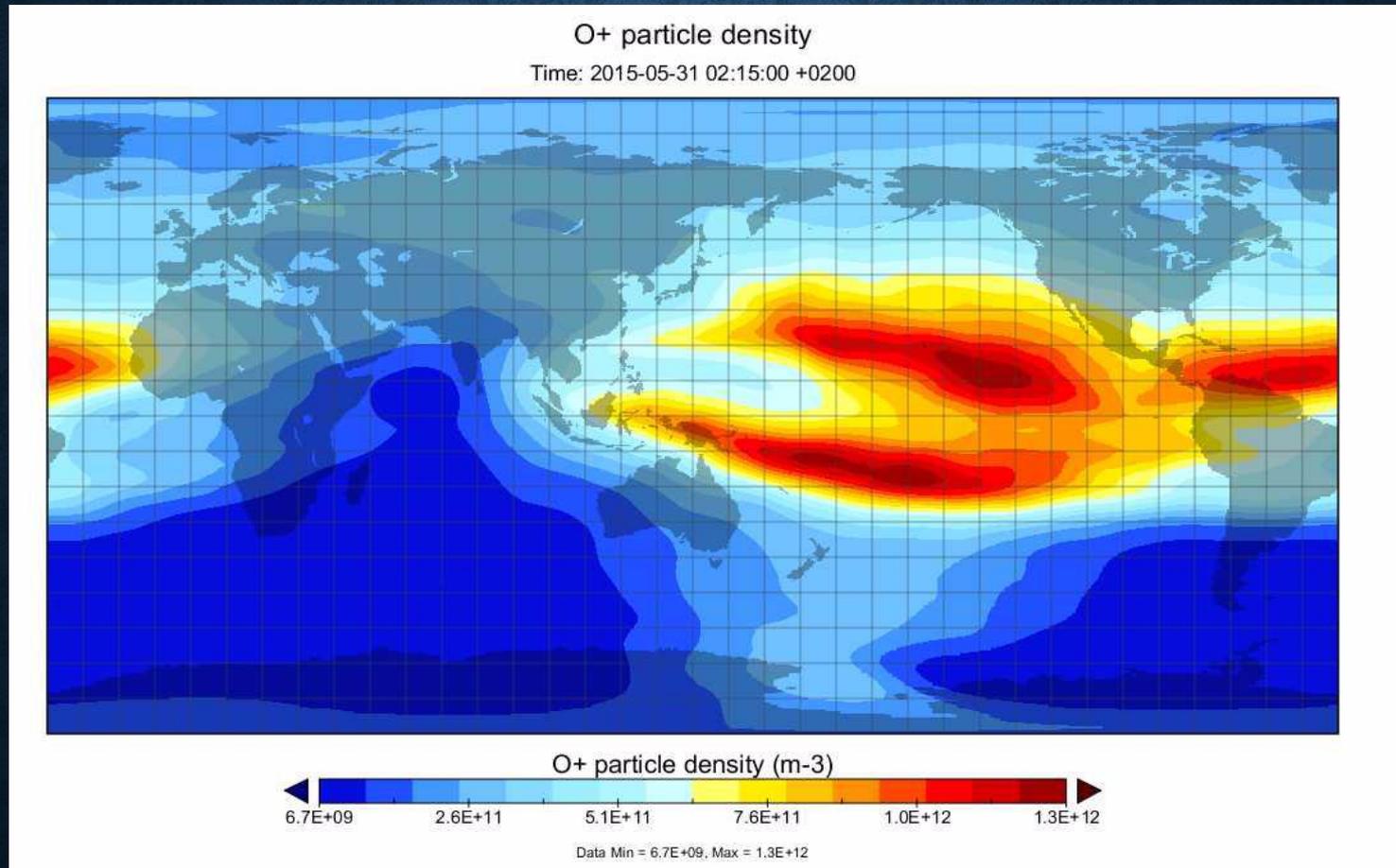
電離圏の生成と高度分布



太陽紫外光の入射による
大気の電離



電離圏の分布・日変化

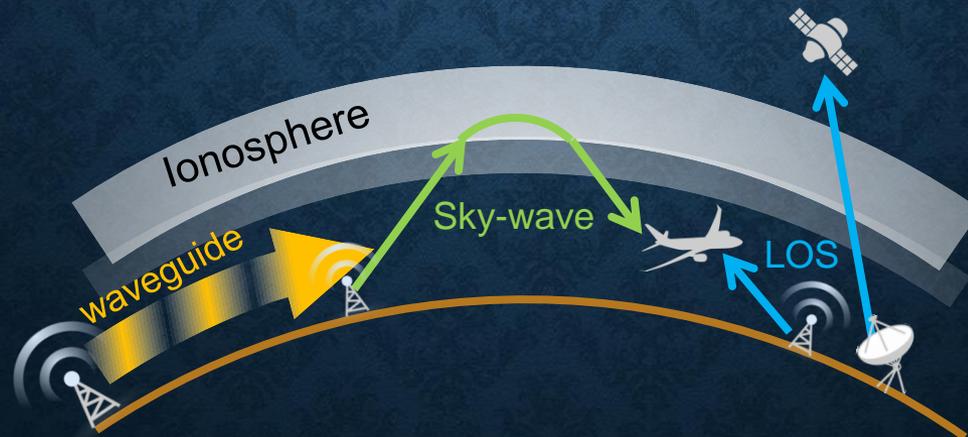


- おおまかに日中・低緯度は電子密度が濃く、夜間・高緯度は小さい。
- 大きな日々の変動や、不規則な激しい乱れがある。

電波の伝搬の仕方と電離圏の関わり

周波数帯ごとの電波伝搬

電波 (周波数)	長波 LF (30-300kHz)	中波 MF (0.3-3MHz)	短波 HF (3-30MHz)	超短波 VHF (30-300MHz)	極超短波 UHF (0.3-3GHz)
主な利用 (※1)	<ul style="list-style-type: none"> 標準電波 船舶・航空機用ビーコン 	<ul style="list-style-type: none"> 船舶通信 船舶・航空機用ビーコン 	<ul style="list-style-type: none"> 船舶・航空機通信 短波放送 アマチュア無線 	<ul style="list-style-type: none"> FM放送 防災行政無線 消防無線 列車無線 航空管制通信 	<ul style="list-style-type: none"> TV放送 防災行政無線 衛星通信 GNSS 列車無線
電波伝搬の仕方 (※2)	Waveguide mode (地表 - 電離層間導波管伝搬)			Line-of-sight (見通し内伝搬)	



※1 総務省ウェブサイト「周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴」参考
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/index.htm>

※2 ITU Handbook 「The ionosphere and its effects on radio wave propagation」参考

電波の伝搬の仕方と電離圏の作用①

(Waveguide mode)

該当する電波

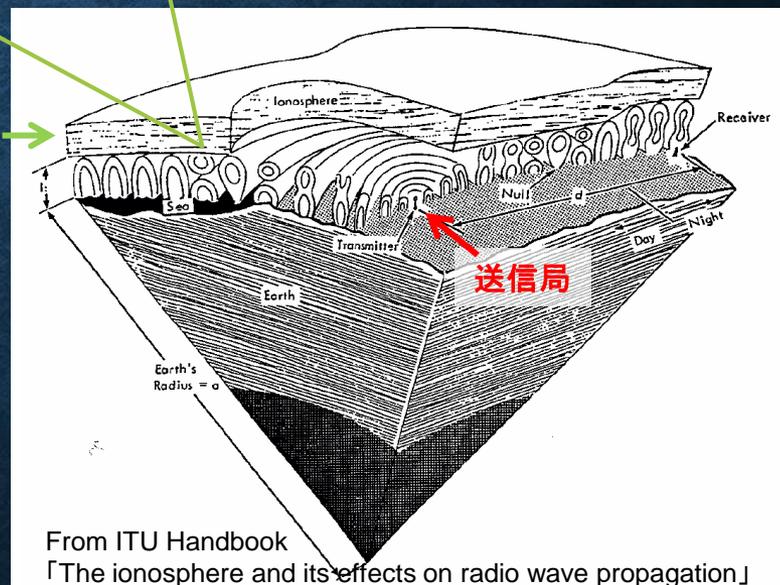
- VLF
- LF (<60kHz)



電離圏の作用

- 上部境界条件の変化 → **位相、振幅の変化**
- 影響する電離圏の現象
D層の異常電離 (← 太陽フレアに伴うX線の入射、プロトン粒子フラックス)

電離層



From ITU Handbook
「The ionosphere and its effects on radio wave propagation」

電波の伝搬の仕方と電離圏の作用②

(Sky-wave propagation)

該当する電波

LF (> 60kHz)、MF、HF、VHF

電離圏の作用

- 電離圏電子・イオンの応答が電波に合成 → **電波の屈折・反射**
- 臨界周波数 $f_c \propto (\text{電子密度})^{1/2}$
 $f < f_c$ で反射、 $f > f_c$ で透過 (鉛直伝搬)

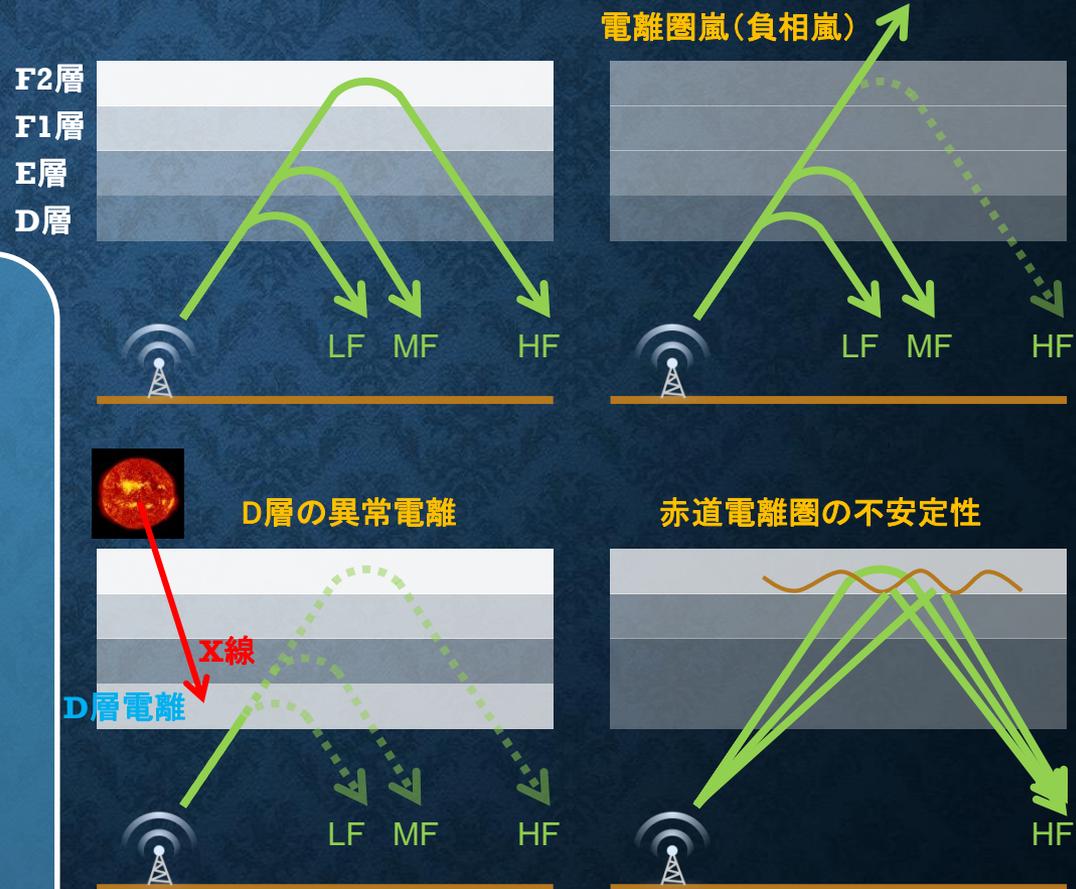
- 影響する電離圏の現象

電離圏嵐

- MUF (最大利用可能周波数) の減少等
- D層の異常電離** (太陽フレアX線、プロトン)
- 電波の吸収

赤道電離圏の不安定、オーロラ帯

- F層スプレッド



スポラディックE層によるVHFの異常伝搬と思われる例

神戸のKiss FM、突然中国語放送に

ツイート おすすめ2 シェア

印刷



兵庫県丹波地域を移動中、カーラジオで神戸のFM局「Kiss FM KOB E」を聴いていると、篠山市内で頻りに雑音が混じり、時折なぜか中国語の放送に切り替わってしまう。原因を調べてみた。(今泉欣也)

同FMは神戸市の摩耶山上に親局、県内6カ所に中継局があり、7種類の周波数で放送している。エリアによって最適な周波数が異なり、例えば丹波市では、市内にある氷上中継局の78.3メガヘルツで鮮明に聴くことができる。

一方、篠山市には中継局がなく、地理的に親局(89.9メガヘルツ)と氷上局の受信エリアだが、姫路中継局(77.6メガヘルツ)が入る場所も。3種の電波が混在し、同じ周波数に合わせたままでは、きれいに入らないケースもあるようだ。

(神戸新聞 2014/8/8の記事より)

米航空会社、「磁気嵐」警戒で北極付近の航路変更

2012年 01月 25日 10:09 JST

記事を印刷する | < ブックマーク | 1ページに表示

[-] 文字サイズ [+]

おすすめ 10 ツイート 29 チェック +1 0



1 of 1 [Full Size]

[24日 ロイター] 米デルタ航空(DAL.N: 株価, 企業情報, レポート)は24日、太陽の大規模なコロナガス噴出によって発生する磁気嵐の影響を回避するため、北極近くを通る航空機のルート変更を行ったと発表した。ルートの変更で15分ほどの遅れが生じたという。

ワールド

- 米大統領選・共和党ミズーリ州予備選、サンタラム氏が勝利=TV
- NASAが「宇宙タクシー」開発強化、民間企業を追加募集
- 習近平副主席の訪米、米中間の信頼関係改善へ=中国外務次官
- 米エネルギー情報局、世界の原油需要見通しを4カ月ぶり引き上げ

デルタ航空のスポークスマンは「通信に支障をきたす恐れがあったため、北極近くのルートを通常よりも南に変更した」とコメント。また、ユナイテッド航空(UAL.N: 株価, 企業情報, レポート)は23日の1便でルート変更を行ったと発表した。

米宇宙天気予報センターは23日、磁気嵐により、北極近くを航行する航空機のナビゲーションシステムに使用される高周波無線通信などに影響が出る恐れがあると警戒を呼び掛けている。今回の磁気嵐は2005年以降、最も規模が

大きなものだったという。

(Thomson Reuters 2012/1/25 の記事)

電波の伝搬の仕方と電離圏の作用③

(Line-of-sight propagation)

該当する電波

VHF、UHF

電離圏の作用

- 電離圏電子・イオンの応答が電波に合成→**電波の屈折**

- 電離圏を透過する電波の群遅延(sec)

$$t = 1.34 \times 10^{-7} (TEC) / f^2$$

- 影響する電離圏の現象

電離圏嵐(正相・負相)、伝搬性擾乱、SED

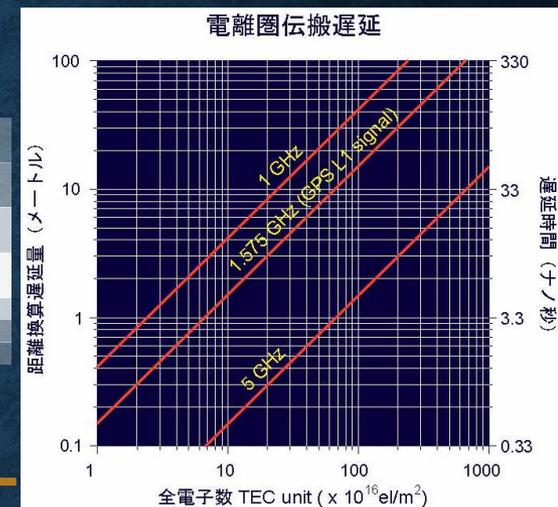
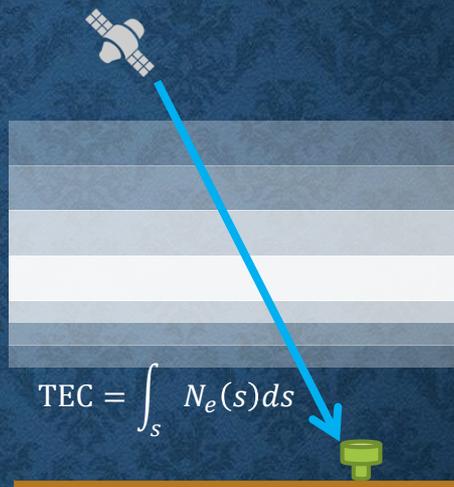
→遅延量の増大・勾配の増加

プラズマバブル

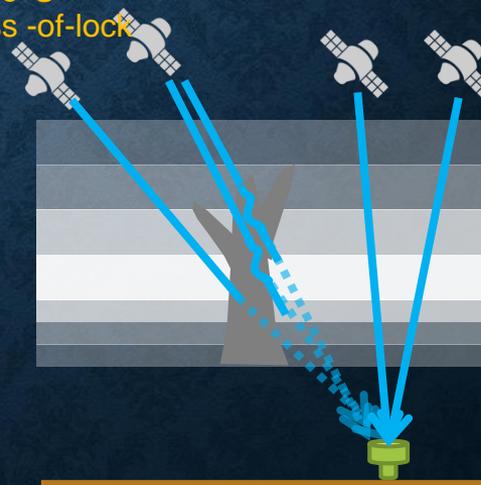
→シンチレーション、Loss of Lock

D層の異常電離(太陽フレアX線、プロトン)

→電波の吸収



プラズマバブルによる
GNSS電波のLoss-of-lock





An artist's depiction of the chaos following the crash landing on top of Takur Ghar.
Keith Rocco, The Battle of Takur Ghar, National Guard Heritage Painting, 2003/U.S. Air Force/Wikimedia Commons

'Space bubbles' may have led to deadly battle in Afghanistan

By David Shultz | Sep. 23, 2014, 4:45 PM

On the morning of Monday, 4 March 2002, sometime just before the sun came up, an MH-47E Chinook helicopter carrying a group of U.S. Army Rangers flew low across a rugged Afghan landscape. Their destination, $33^{\circ}20'34''\text{N } 69^{\circ}12'49''\text{E}$, was a snowcapped mountain called Takur Ghar. It was a rescue mission; hours earlier a team of Navy SEALs had been shot down by al-Qaida forces at the mountain's summit and needed extraction. But the Rangers had been given the wrong coordinates and were headed right into the same al-Qaida forces that shot the SEALs down. Back at the U.S. command post, radio operators tried desperately to warn the Chinook, but the message was never received, and the helicopter was downed by another al-Qaida rocket-propelled grenade. The Rangers' rescue mission turned into a 17-hour firefight—one of the deadliest engagements of the war for U.S. forces, costing seven lives.

The jagged peaks of Afghanistan have caused plenty of communications difficulties for U.S. forces, but researchers suspect that the doomed rescue mission may have fallen victim to a less visible source of interference: plasma bubbles. Their research, published online this month in *Space Weather*, suggests that turbulent pockets of ionized gas may have deflected the military satellite radio signals enough to cause temporary communications blackouts in the region.

プラズマバブルによって電波を受信できなくなったと考えられる例

(Science誌HP 2014/9/23の記事より)

各電離圏現象がいつどこで発生するか

各電離圏の擾乱現象の発生タイミング・頻度・場所



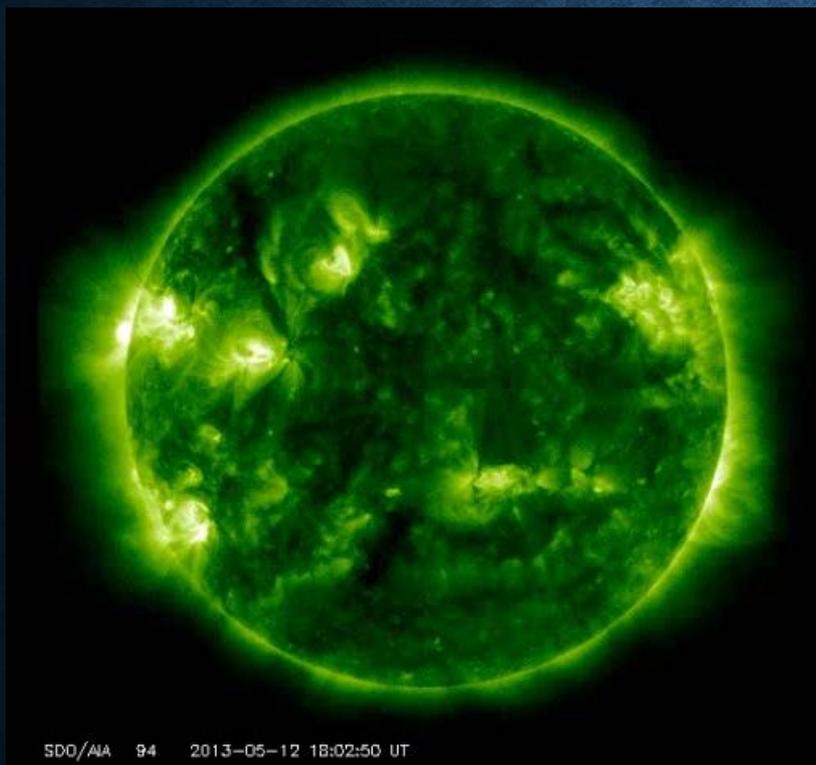
現象	Dellinger現象	極冠吸収	伝搬性擾乱(TID)	電離圏嵐・正相	電離圏嵐・負相	プラズマバブル	スポラディックE
発生頻度	1-数回/年	1-数回/10年	1-数回/年	中規模: 1-数回/年 大規模: 1-数回/10年	中規模: 1-数回/年 大規模: 1-数回/10年	太陽活動・季節によって、ほぼ毎日	季節によって、ほぼ毎日
発生場所	太陽天頂角 < 90度	高緯度	高緯度 中緯度	中緯度	高緯度 中緯度	低緯度	中緯度 低緯度

電波伝搬への影響

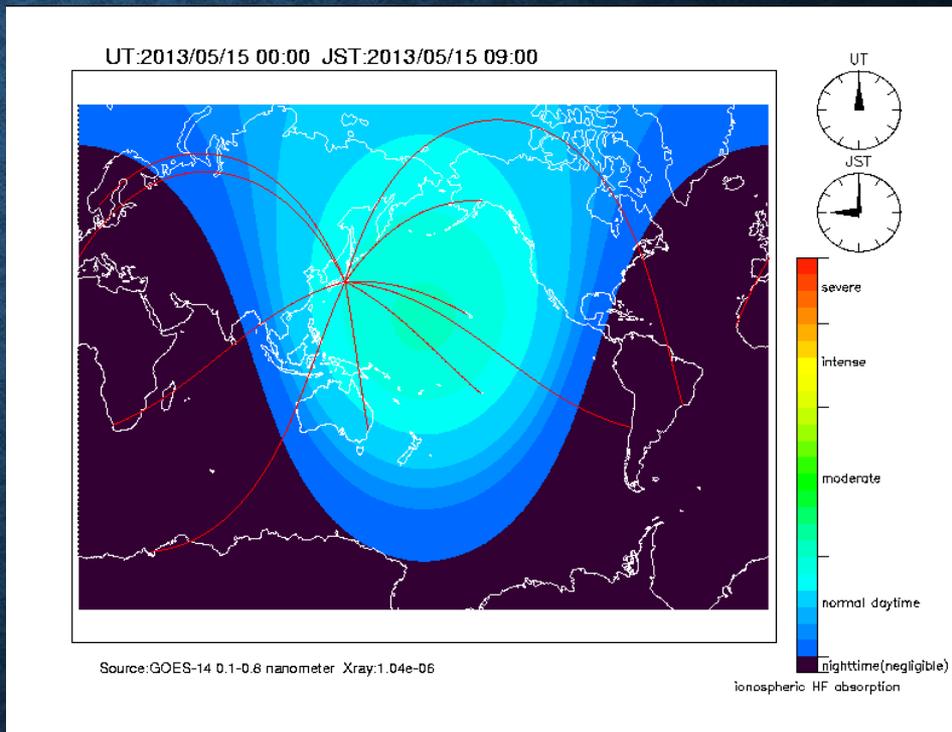
waveguide (LF..)	位相など変調	位相など変調					
Skywave (HF..)	電波吸収	電波吸収		foF2増	MUF低下	スプレッド	異常伝搬
LOS (UHF..)	電波減衰	電波減衰	伝搬遅延変化(勾配増)	伝搬遅延増(勾配増)	伝搬遅延減	シンチレーション、LOL	

Dellinger 現象 事例・原因・予測可能性

事例：2013/05/15 X1.2フレア



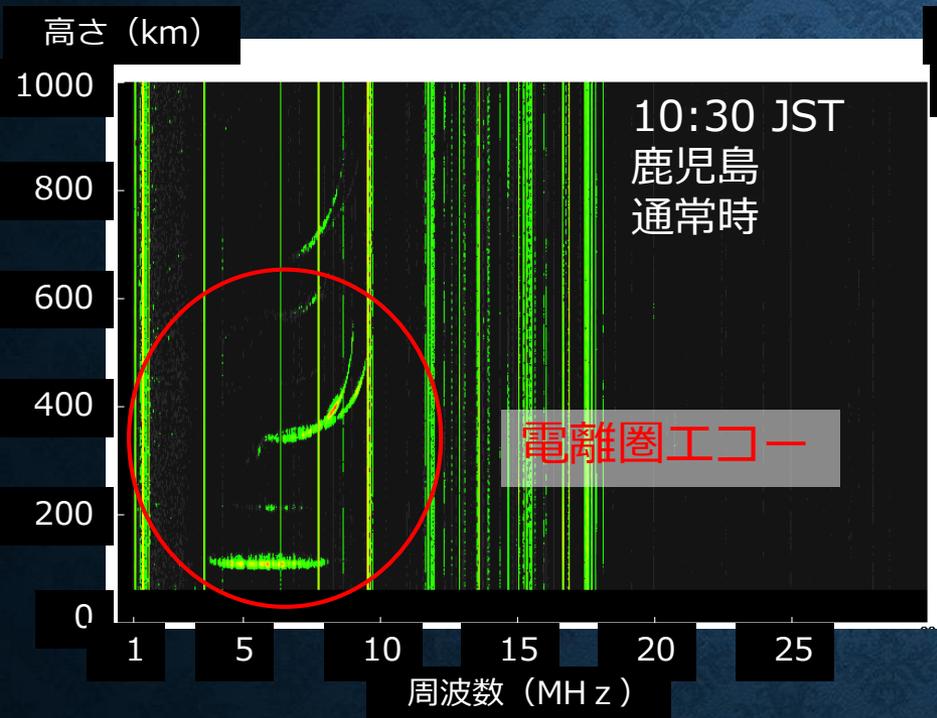
SDO衛星による太陽極端紫外線の観測



太陽X線強度の増加により、下部電離圏（D層）の電離が増加

Dellinger 現象 事例・原因・予測可能性

2013/05/15 X1.2フレアの発生直後のイオノグラム

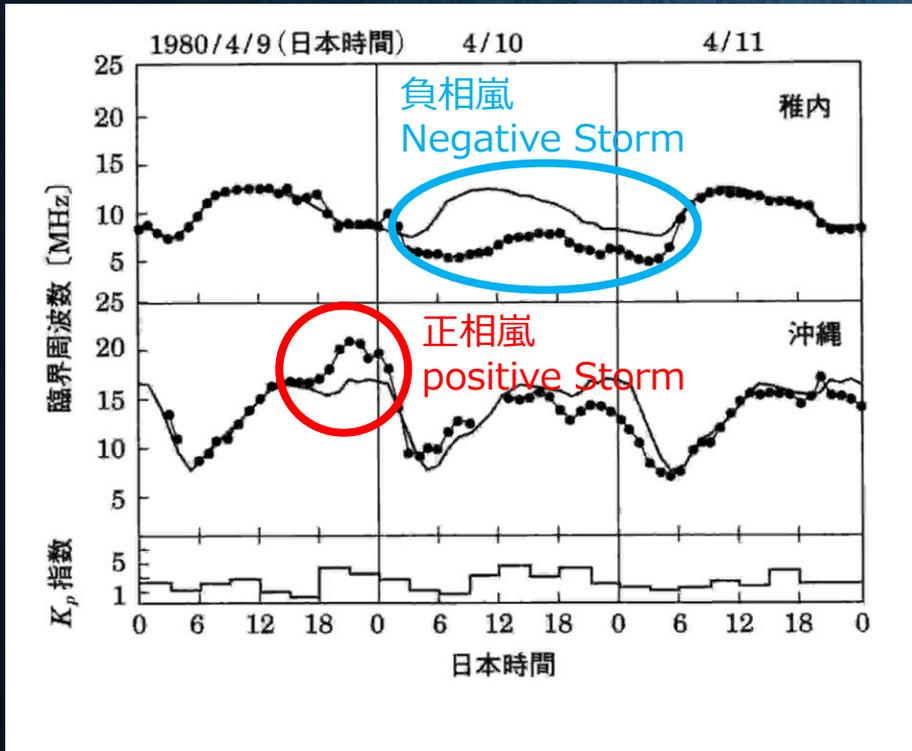


原因: 太陽フレア直後のX線入射がD層を電離→電波のエネルギーを大気が吸収

予測可能性: 現状では太陽フレアの予測を基に予測を行っている

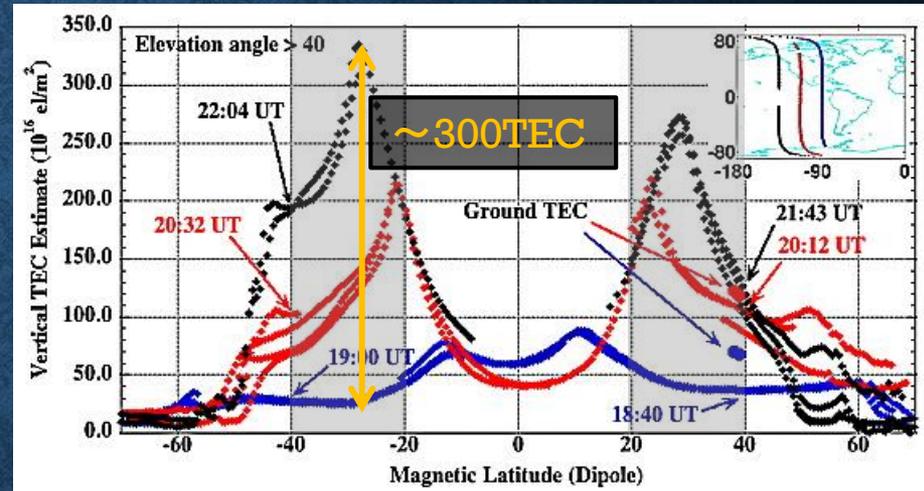
電離圏嵐 事例

中規模の電離圏嵐の例(1980年4月9-11日)



正相嵐のあと負相嵐が起こる例が多い

大規模の電離圏嵐の例(2003年10月30日)※

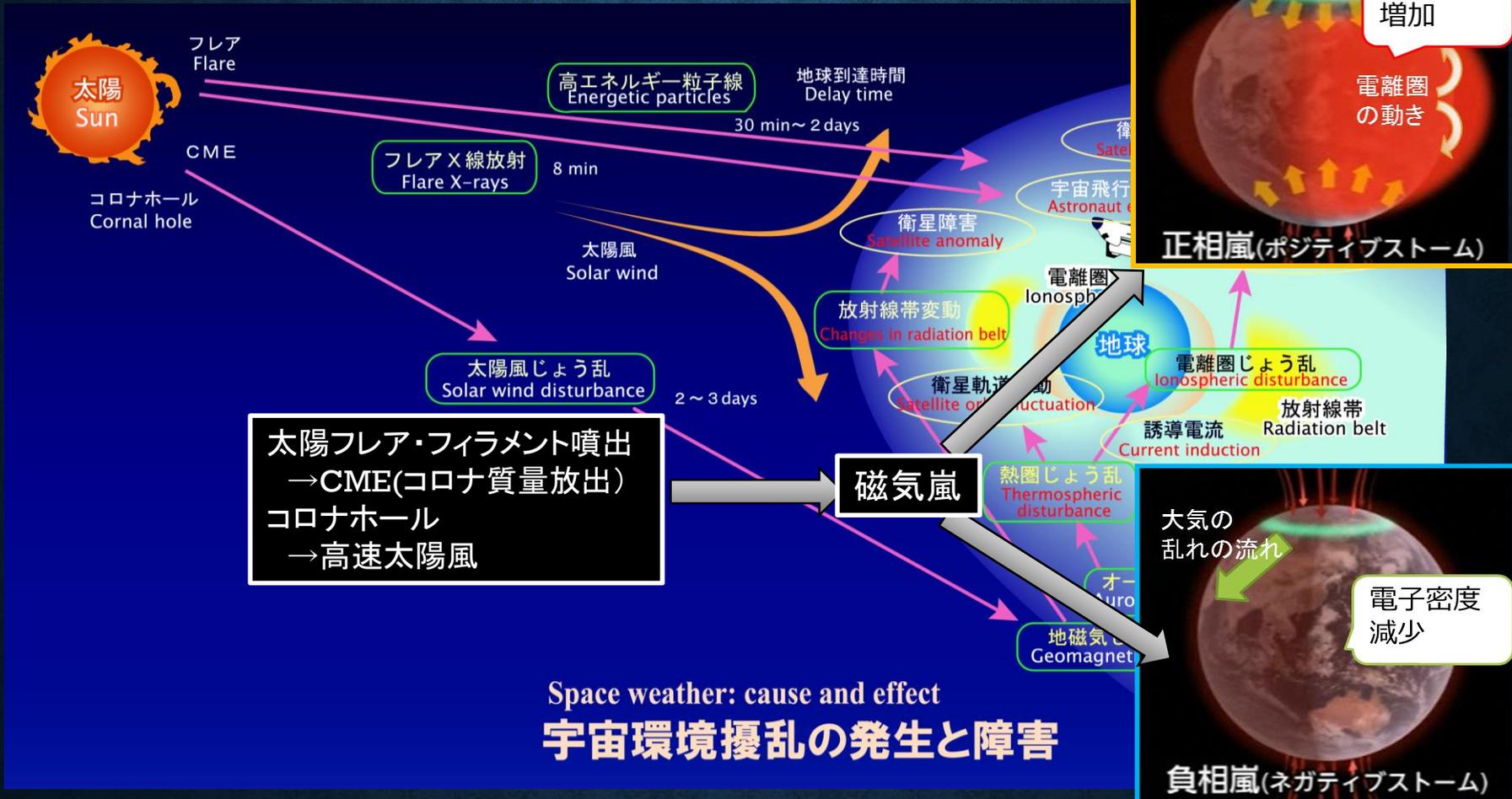


青: 電離圏嵐が起こる前の状態
 赤・黒: 電離圏嵐が発生している状態

電離圏嵐によりTECが~300TEC増加
 (L1の周波数で >40mの遅延量に相当)

※Mannucci et al. [GRL 2005]

電離圏嵐 原因・予測可能性

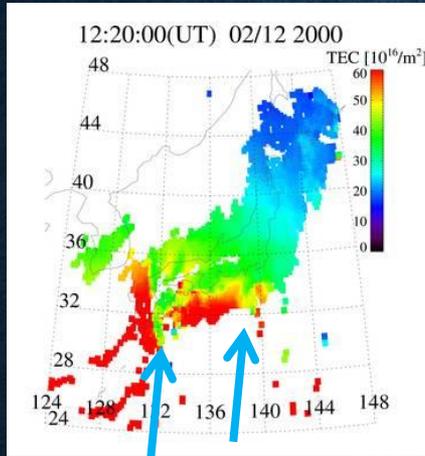


予測可能性

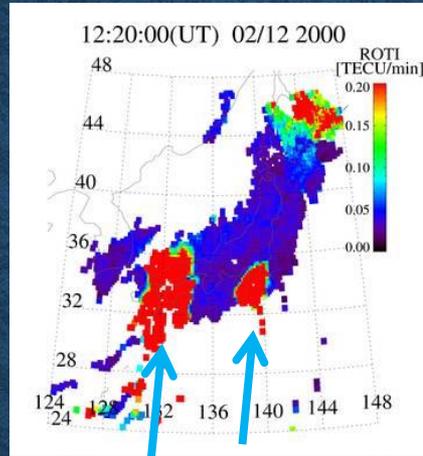
現状: 地磁気の予測に基づき、統計的に電離圏嵐の予測を立てている
 将来: 数値シミュレーションと観測による予測を目標としている

プラズマバブル

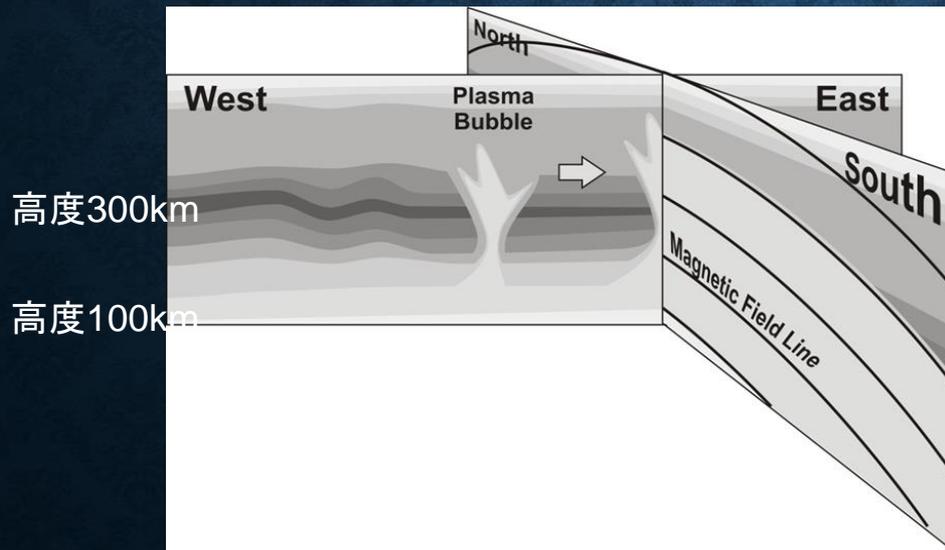
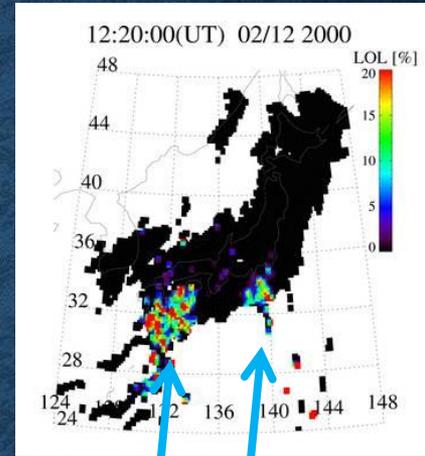
TEC絶対値



ROTI



ロック損失率



発生機構：日没後にF層下部の密度勾配が急増→不安定性が成長

太陽活動が高い&春・秋に発生率が高い

発生の日々変動は未だ研究がなされている

宇宙天気ミニ講座・電離圏編 まとめ

- 社会で利用されている各周波数帯の電波(LF～UHF)の伝搬に電離圏が密接に関わっている。
- 太陽フレア等に起因する宇宙天気現象は、電離圏の乱れを通じて、そうした電波伝搬に影響する。
- 今回扱っていないが、下層大気に起因する電離圏変動・擾乱もある。