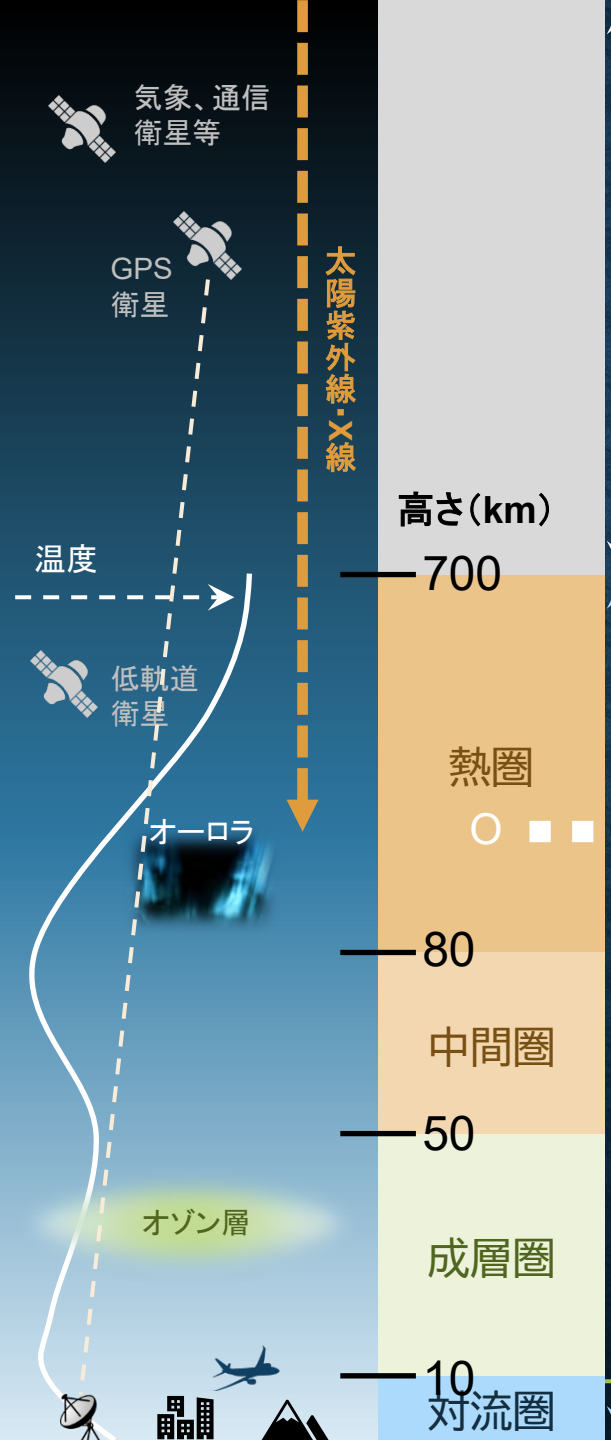
宇宙天気ミニ講座（電離圏編）

情報通信研究機構　電磁波研究所

電磁波伝搬研究センター　宇宙環境研究室　陣　英克

内容

- 電離圏の基本的な性質
- 電離圏と電波の伝搬
- 電離圏の乱れと電波利用への影響
- 熱圏の乱れの宇宙利用への影響
- NICTの情報提供について



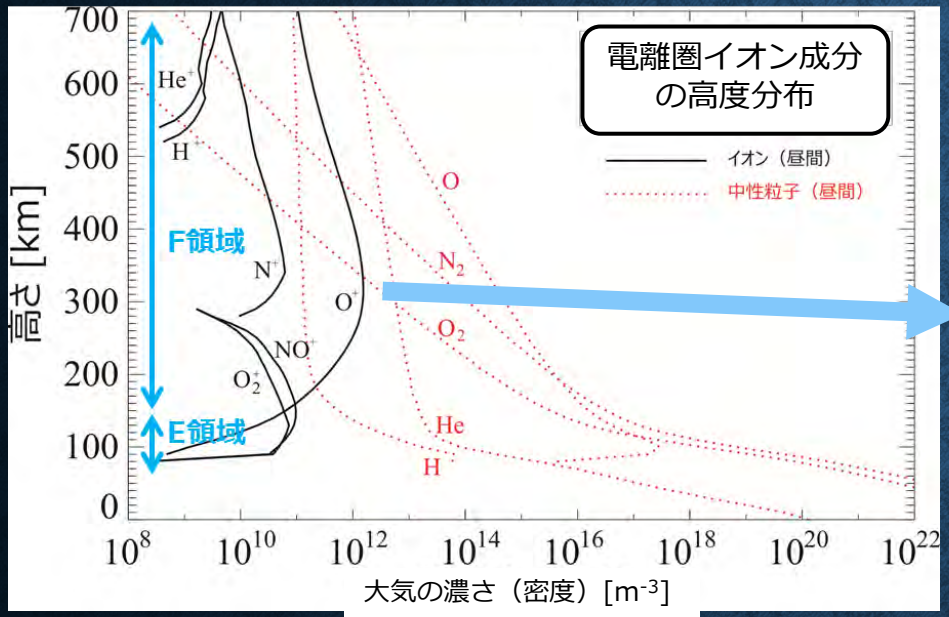
熱圏と電離圏はどこにあるか？

- 地球大気と宇宙空間の境界にある（地球大気の最上層）
- 太陽から入射する極端紫外線・X線を吸収　→熱圏の加熱
- 熱圏大気の一部が電離し、電離圏を形成
- 電離圏は地上-衛星（地上-地上）間の通信、熱圏は低軌道衛星やスペースデブリの軌道に影響

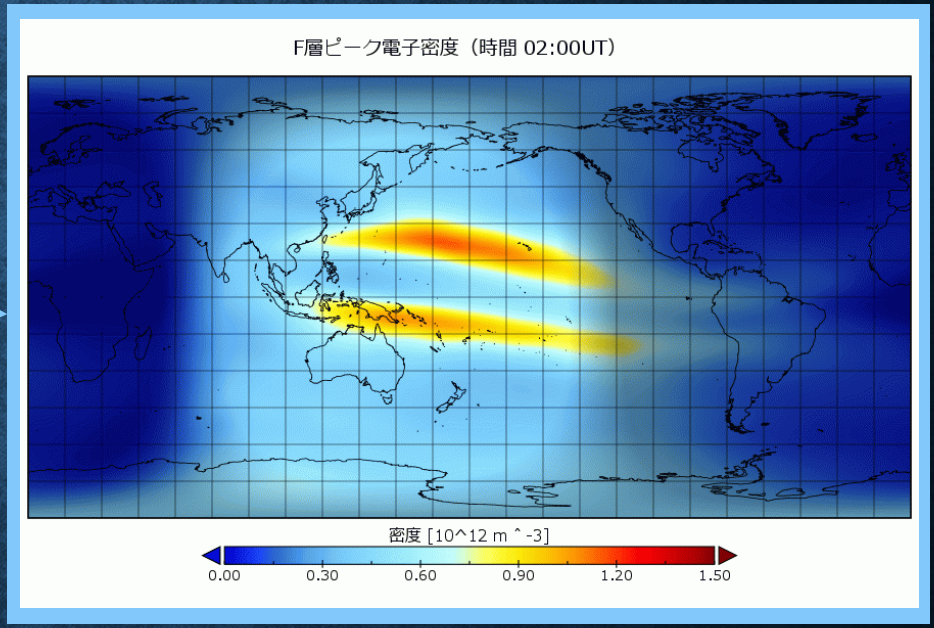
NICT

電離圏の分布・日変化

高さ方向の分布



水平方向の分布・日変化



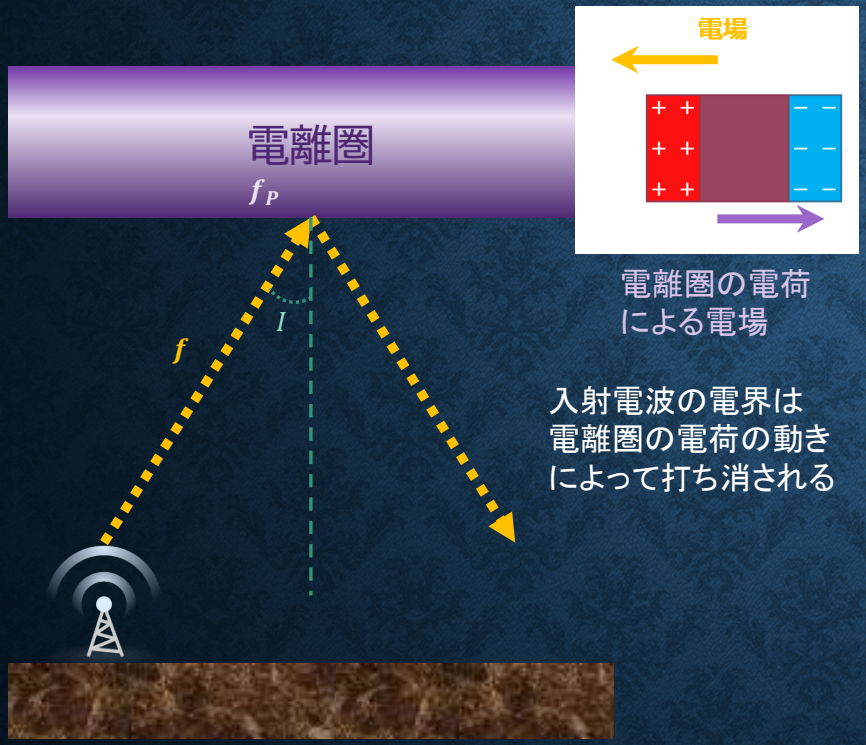
- 電離圏は高度によってD, E, F領域に区分され、主要なイオンが異なる。
- 密度のピークは高度300-400kmあたりにある。
- 太陽光のあたる日中・低緯度に電子密度が濃く、夜間・高緯度は薄い。
- 電子密度は、電離だけでなく、輸送の影響もある（赤道異常帯）

内容

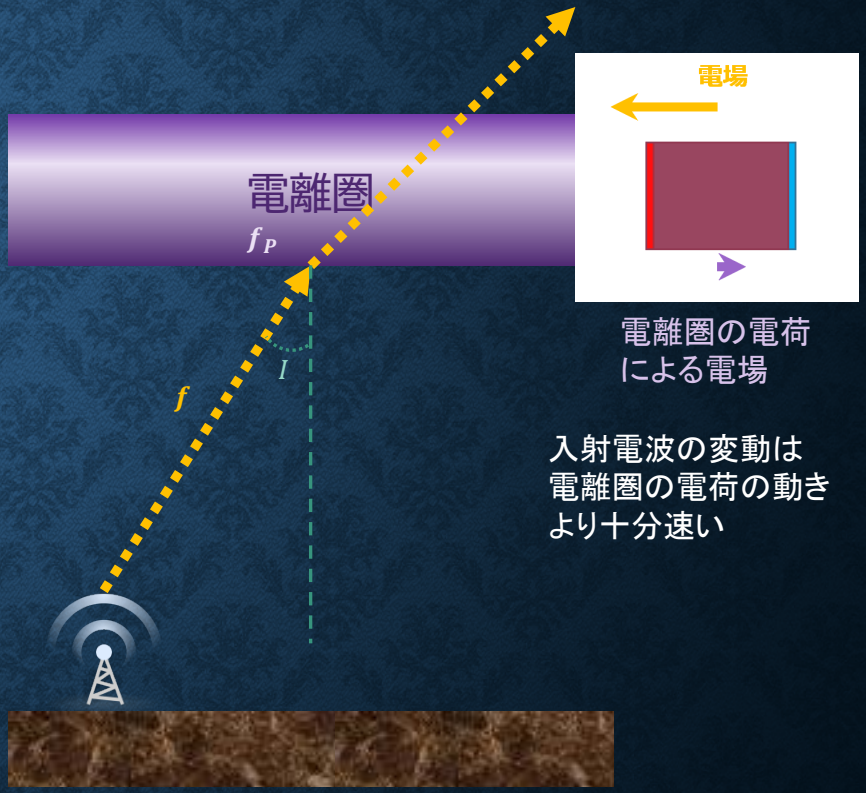
- 電離圏の基本的な性質
- **電離圏と電波の伝搬**
- 電離圏の乱れと電波利用への影響
- 熱圏の乱れの宇宙利用への影響
- NICTの情報提供について

電離圏電荷の電波への作用

周波数の低い電波（$f < f_P/\cos I$）



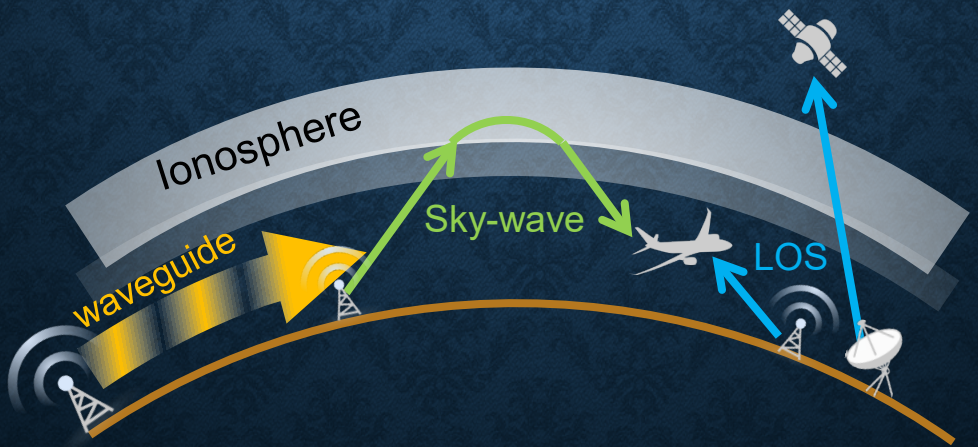
周波数の高い電波（$f > f_P/\cos I$）



- 電離圏のイオン・電子は固有の周波数（電子密度に依存： $f_P \propto \sqrt{\mathrm{N_e}}$）で振動
- 周波数の低い電波（$f < f_P/\cos I$）は、電離圏で反射
- 周波数の高い電波（$f < f_P/\cos I$）は、電離圏を通過（少し遅延が生ずる）

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）	• 標準電波 • 船舶・航空機用ビーコン	• 船舶通信 • 船舶・航空機用ビーコン	• 船舶・航空機通信 • 短波放送 • アマチュア無線	• FM放送 • 防災行政無線 • 消防無線 • 列車無線 • 航空管制通信	• 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）				
		Sky-wave（電離圏伝搬）			
				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

内容

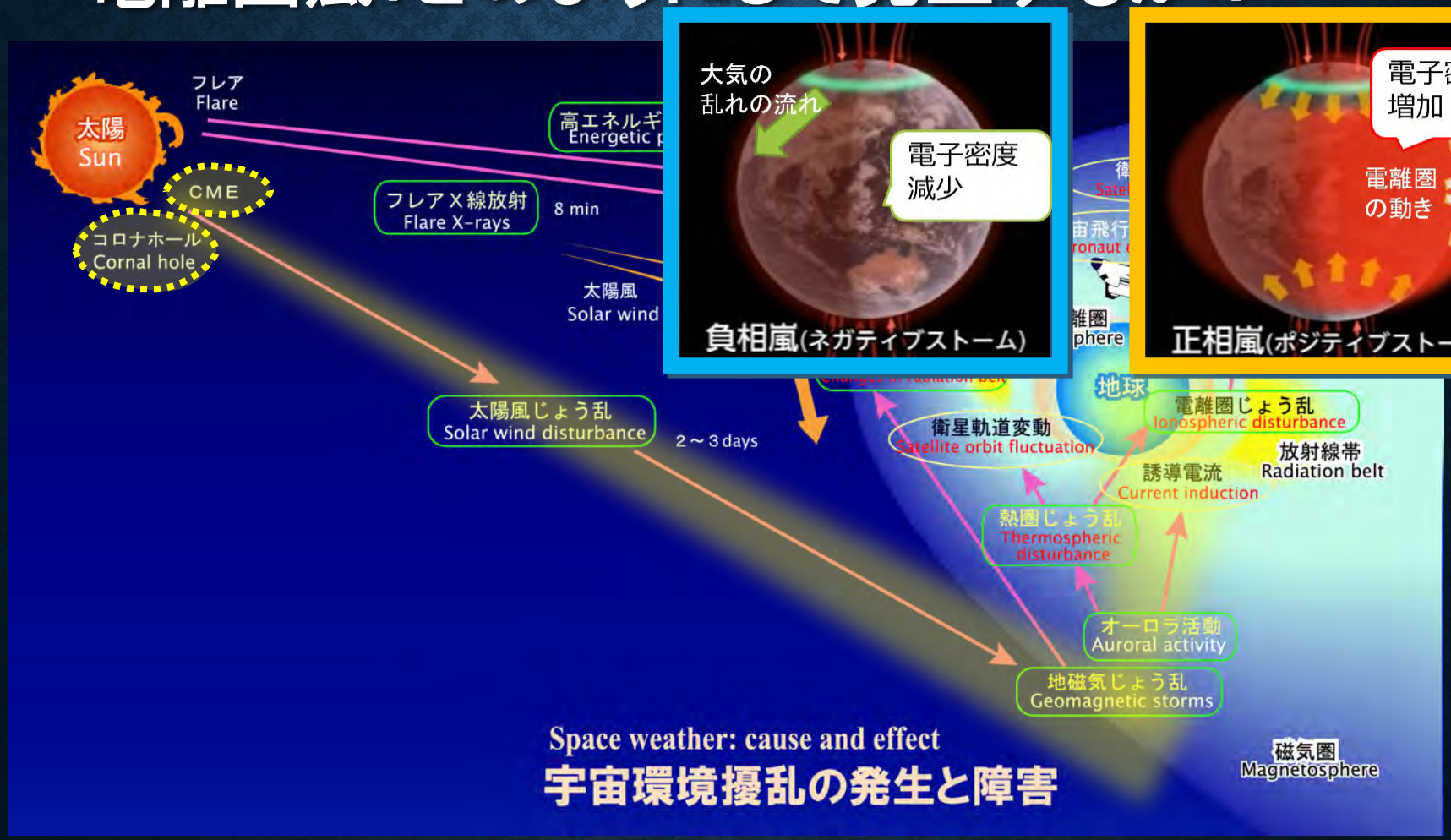
- 電離圏の基本的な性質
- 電離圏と電波の伝搬
- **電離圏の乱れと電波利用への影響**
- 熱圏の乱れの宇宙利用への影響
- NICTの情報提供について

電離圏の不規則な変動が電波の利用に影響

- **電離圏嵐**
- **プラズマバブル**

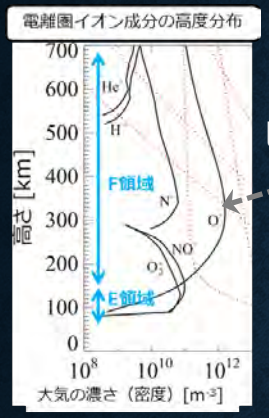
について紹介

電離圏嵐：どのようにして発生するか？



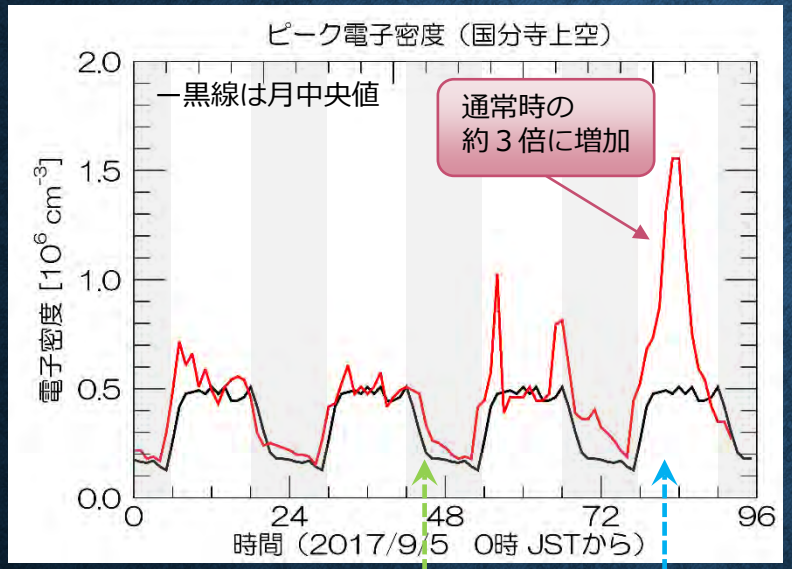
太陽風の状態（速度、磁場の向き・大きさ） と時間変化、および地球上の場所によって電離圏の電子密度が通常より増大（正相嵐）または減少（負相嵐）することがある。

電離圏嵐：事例



ピーク電子密度

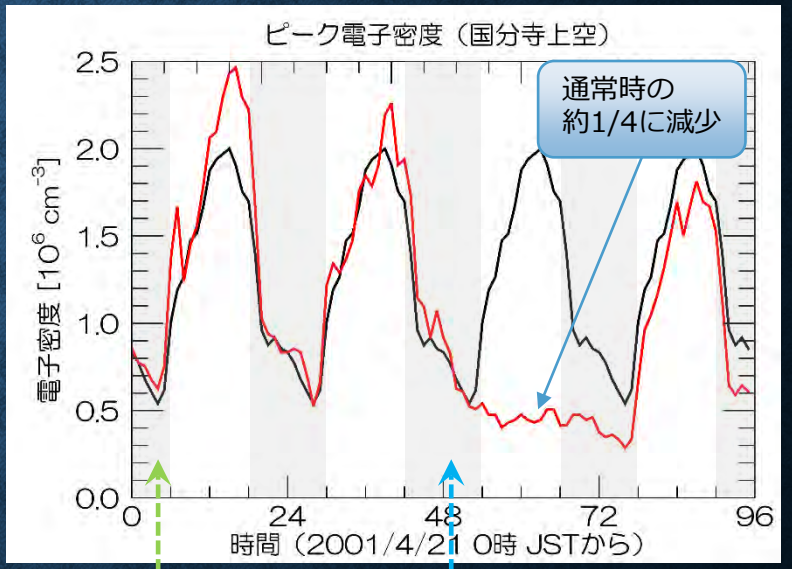
正相嵐の例（2017年9月8日）



太陽フレア発生
（X9.3）

磁気嵐が発達
（Dst指数=-122nT）

負相嵐の例（2001年4月23日）

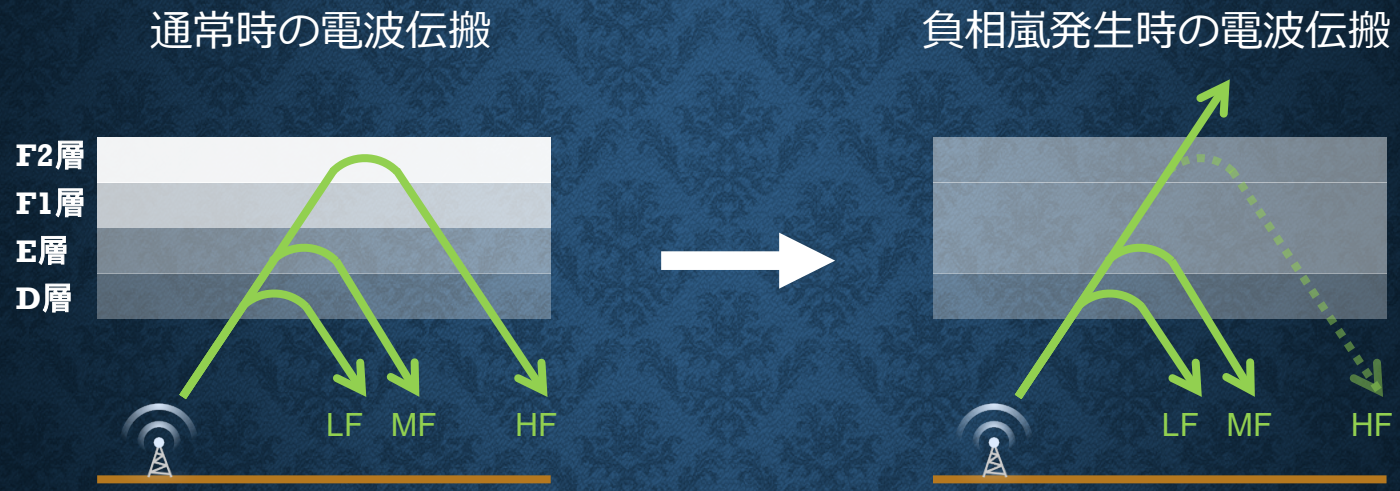


太陽フレア発生
（M4.2）

磁気嵐が発達
（Dst指数=-102nT）

- 電離圏観測装置イオノゾンデによって東京（国分寺）上空で観測された電離圏嵐の例
- 中規模の磁気嵐によって、中～大きめの正相嵐・負相嵐が発生（1-数年に1回発生するレベル）

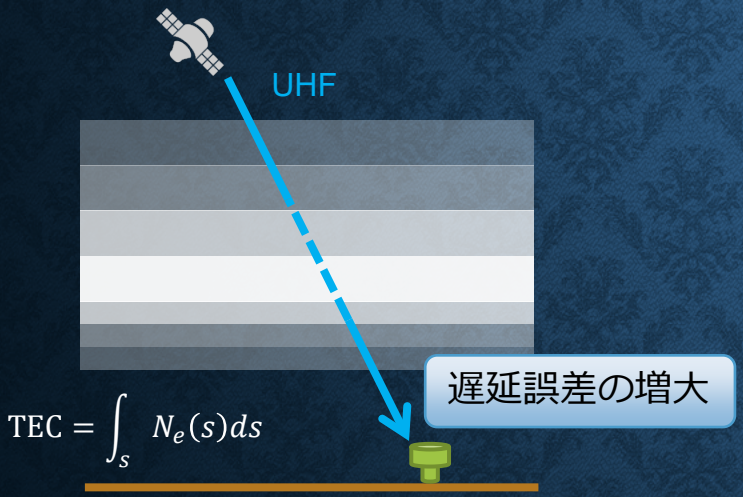
負相嵐が電波利用に及ぼす影響

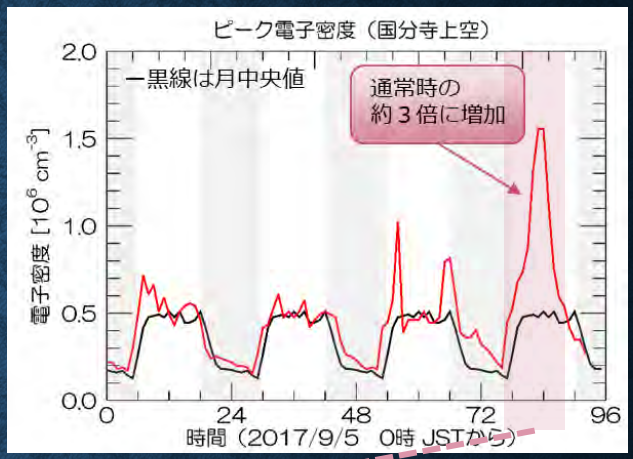


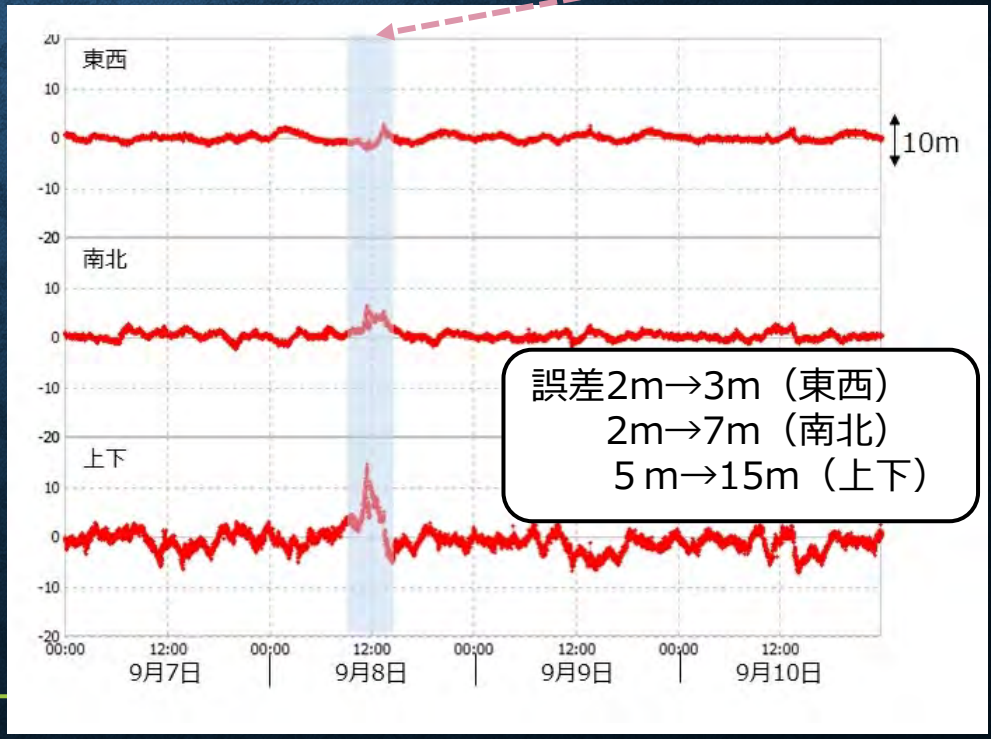
- 電離圏のイオン・電子は固有の周波数（電子密度に依存： $f_P \propto \sqrt{\mathrm{N_e}}$）で振動
- 周波数の低い電波（$f < f_P/\cos I$）は、電離圏で反射し、周波数の高い電波（$f < f_P/\cos I$）は、電離圏を通過
- 電子密度の減少（負相嵐）によってf_Pが小さくなると、それまで電離圏で反射していた電波が電離圏を通過するようになる。

正相嵐が電波利用に及ぼす影響

正相嵐の発生→電波の遅延が増大
→測位誤差の増大





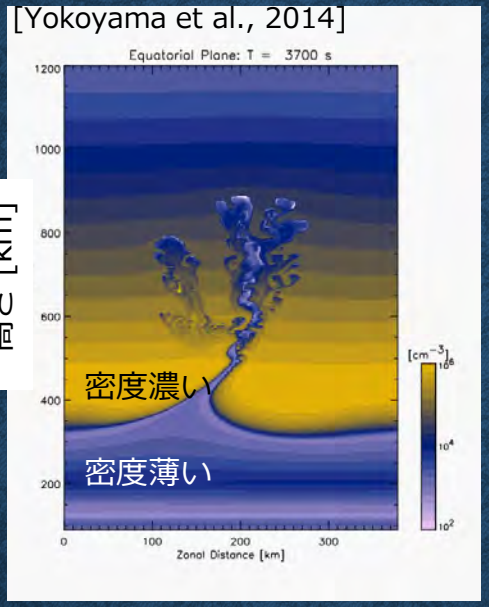


国土地理院様HPからの抜粋→
つくば市の電子基準点の解析。カーナビやスマホなど一般のGPS測位方式では電離圏嵐による測位誤差が増大。測量など専門家が仕様する測位方式では電離圏による誤差の増大は起きない。

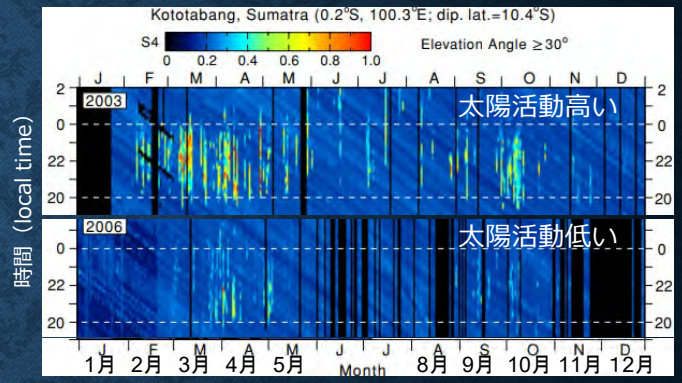
プラズマバブル：どのような現象か？

プラズマバブルのイメージ

プラズマバブル生成のシミュレーション
[Yokoyama et al., 2014]

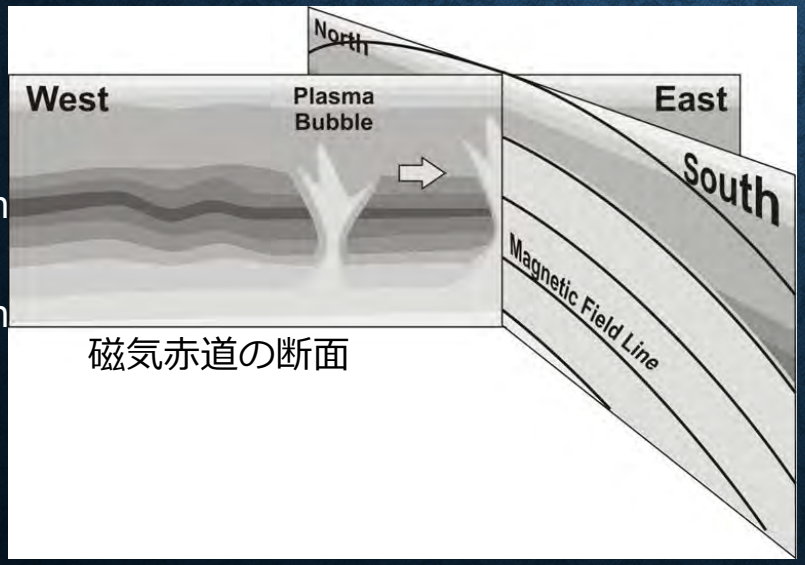


プラズマバブルによる電波のシンチレーション発生
[Ogawa et al., 2009]



高度300km

高度100km

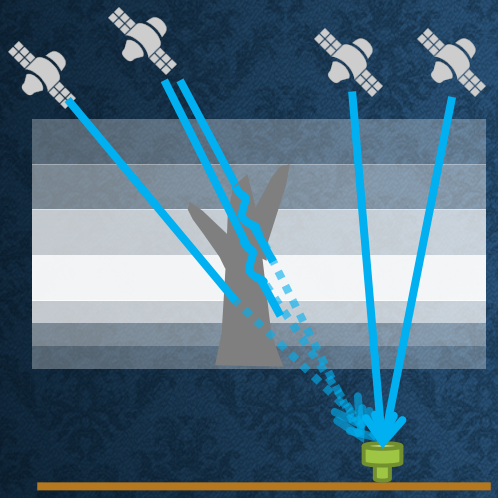


磁気赤道の断面

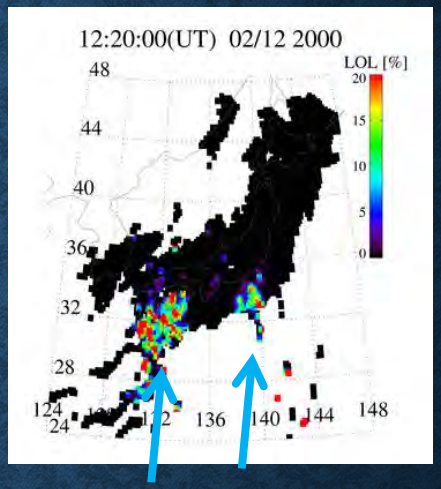
- 低緯度で日没後に発生
- 発生機構：日没後にF層下部の密度が減少→勾配が急増→不安定性が成長
- 太陽活動が高い時期、春・秋に発生率が高い

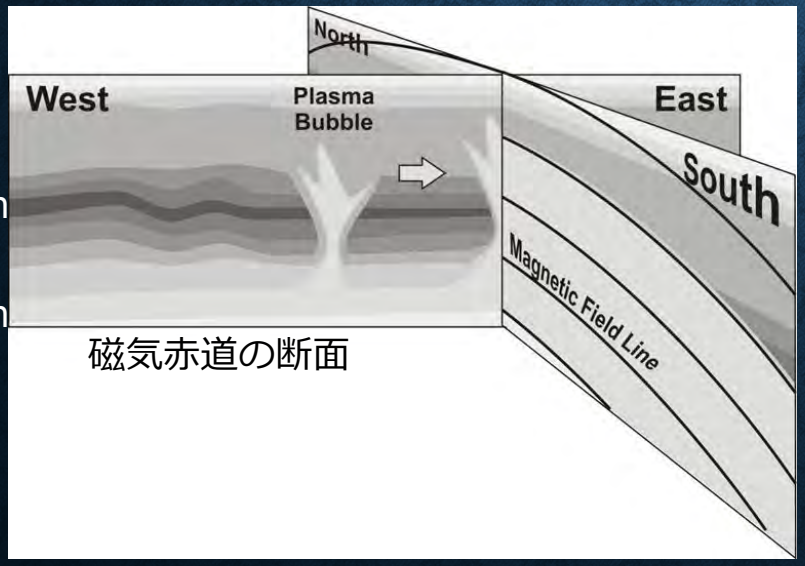
プラズマバブルが電波利用に及ぼす影響

プラズマバブルによるGNSS電波のLoss-of-lock



ロック損失率





高度300km

高度100km

磁気赤道の断面

- プラズマバブルの中に細かい不規則構造→通過する電波の位相の乱れ→シンチレーション
- 補足できる衛星の数が減少
- 日本の南部にプラズマバブルが到達することがある

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

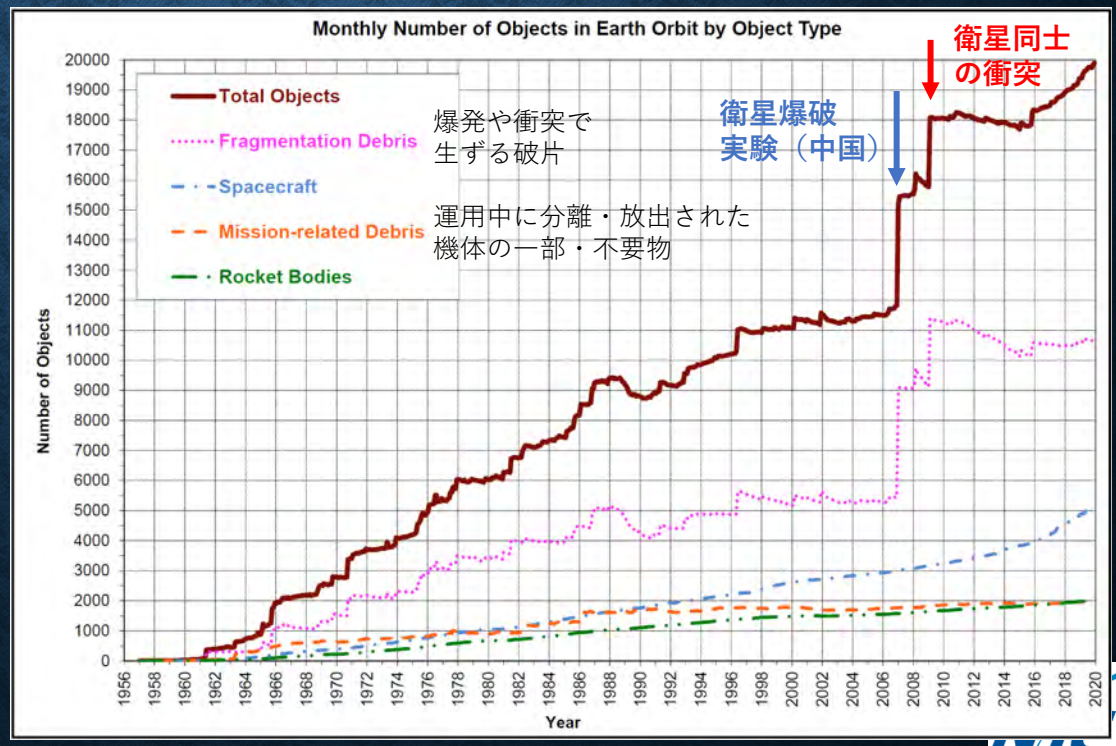
waveguide（LF..）	位相など変調	位相など変調					
Skywave（HF..）	電波減衰	電波減衰		foF2増	MUF低下	スプレッド	異常伝搬
LOS（UHF..）	電波減衰	電波減衰	伝搬遅延 変化（勾配 増）	伝搬遅延 増（勾配 増）	伝搬遅延 減	シンチレーション、LOL	

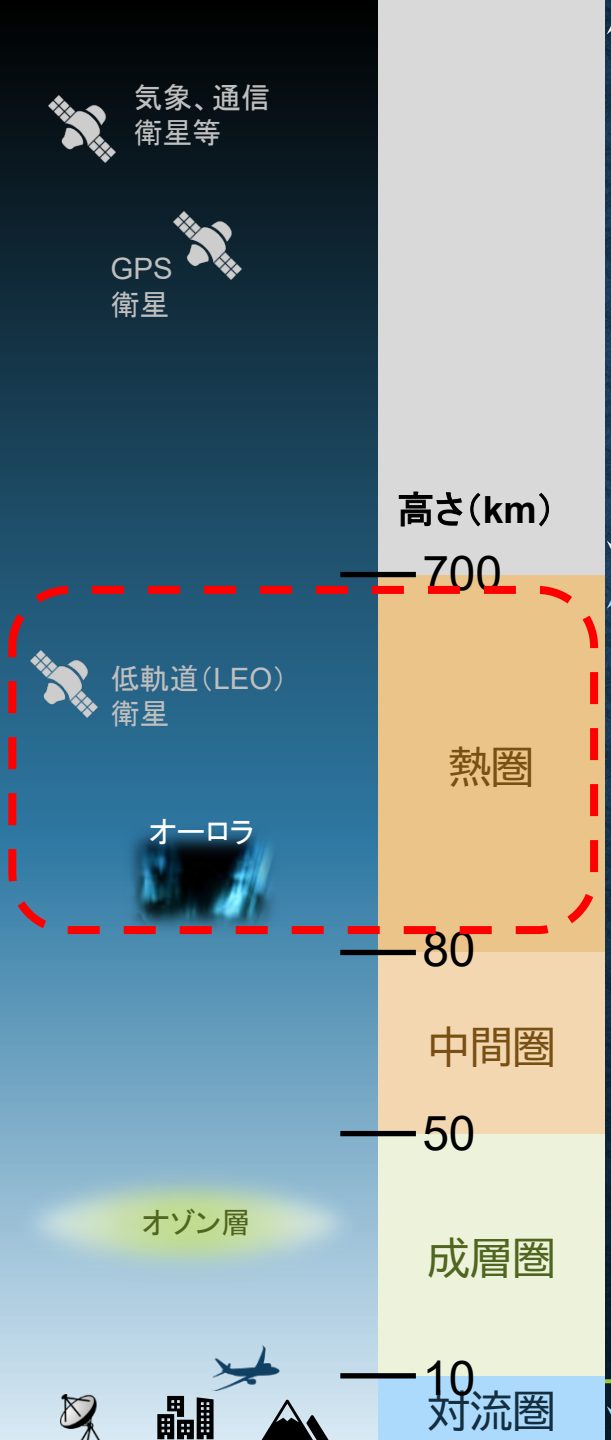
内容

- 電離圏の基本的な性質
- 電離圏と電波の伝搬
- 電離圏の乱れと電波利用への影響
- **熱圏の乱れの宇宙利用への影響**
- NICTの情報提供について

熱圏の乱れの宇宙利用への影響

- 米国地上レーダー網によってトラックされている10cm以上の地球軌道の**衛星・スペースデブリは増加の一途**を辿る。公表されている物体総数20,000個のうち3/4はLEO
- 熱圏大気は衛星・スペースデブリに対して**大気抵抗**として作用→物体の軌道や姿勢に影響

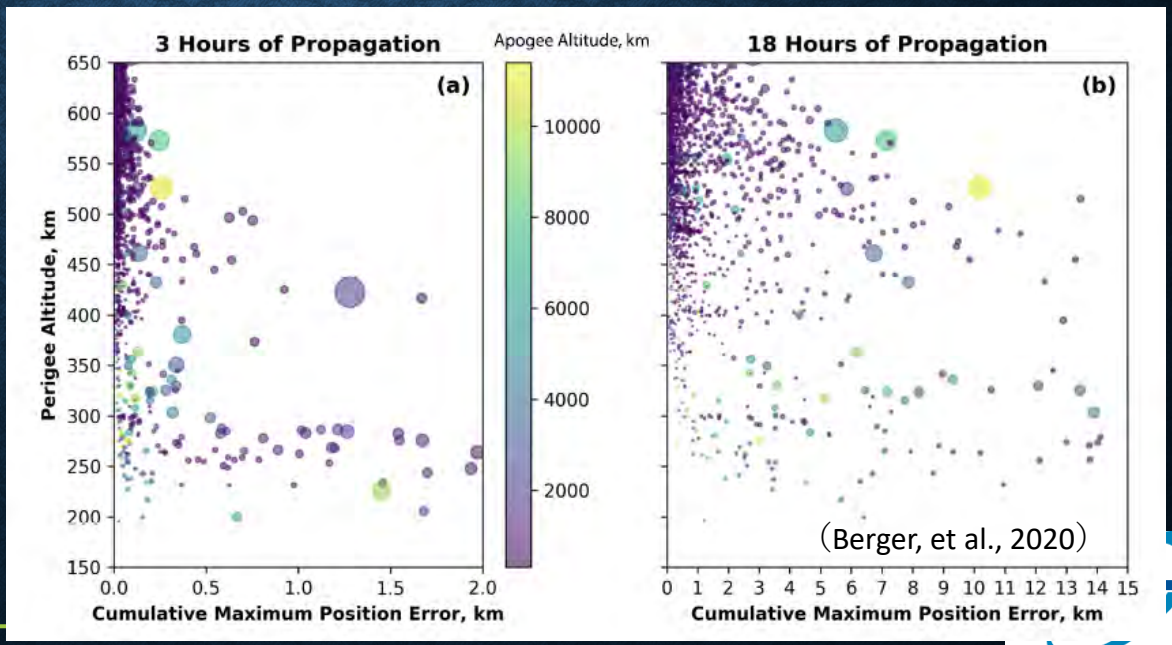


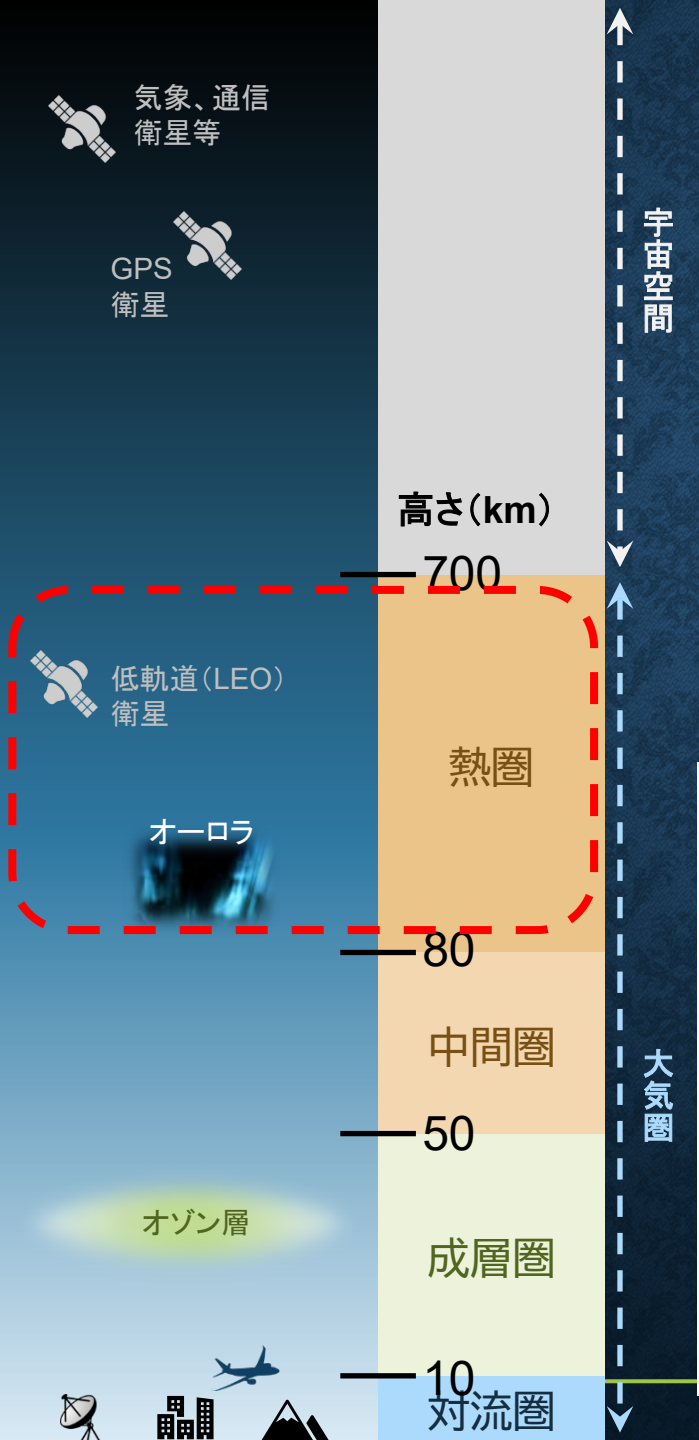


NASA Orbital Debris Quarterly News, Vol.24, Issue 1, 2020

熱圏の乱れの宇宙利用への影響

- 磁気嵐の発生→極域から電流の流入などで**大気が加熱・膨張→大気密度が増加→大気抵抗の増加**
- 磁気嵐（Kp=6-）が3時間、18時間継続した場合に大気抵抗の増加により、物体の軌道が数km、十数km変位
  →衛星－衛星・スペースデブリの衝突リスクに影響
- 2000/7の磁気嵐の影響により「あすか」衛星の軌道で大気密度が数倍に急増
  →衛星の姿勢制御能力を超える大気抵抗のトルクが作用
  →衛星の姿勢の乱れ





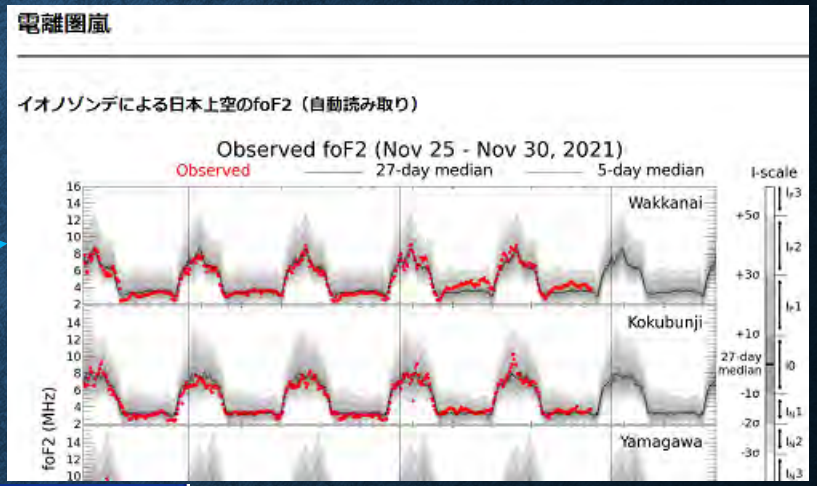
内容

- 電離圏の基本的な性質
- 電離圏と電波の伝搬
- 電離圏の乱れと電波利用への影響
- 熱圏の乱れの宇宙利用への影響
- **NICTの情報提供について**

NICTの情報提供について

NICT宇宙天気予報トップページ（https://swc.nict.go.jp/）
←googleで「宇宙天気」などと検索

「電離圏嵐」「デリンジャー現象」「スポラディックE層」の項目をクリック→**リアルタイムの電離圏状態**のページへ



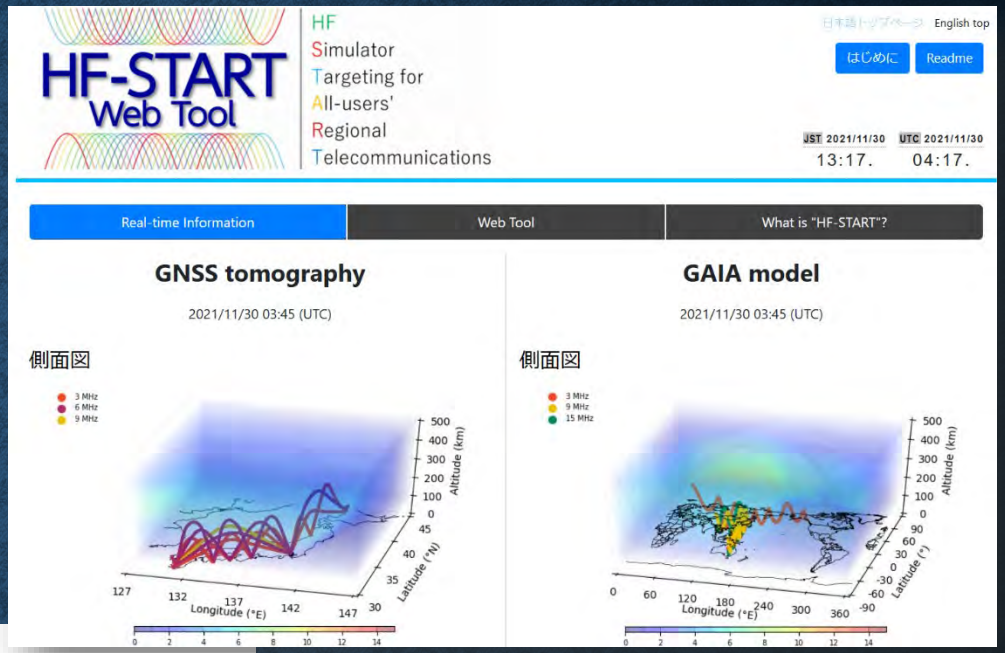
「リンク」の「電離圏ワーキンググループ」から**過去の電離圏観測**データを閲覧、提供するページへ

- 国内イオノゾンデ
- 国内全電子数（GNSS-TEC）
- 東南アジア・南極の電離圏観測

などの情報を提供している。

電波伝搬可視化についてのWebツール「HF-START」

リアルタイムまたは入力画面で任意の日時を入力し、電波伝搬の状況をを可視化することができる



URL： https://hfstart.nict.go.jp/jp/index.html
「リンク」の「HF-START」、またはGoogle等で「HF-START]のワード検索でもアクセス可

電離圏・熱圏・宇宙天気について、より詳しく知りたい場合に

前者は大学院生等向けの公開テキスト、後者は一般の方向けのNICT技術報告書

- 太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック (名古屋大学レポジトリより2021/8に公開)
  https://nagoya.repo.nii.ac.jp/search?search_type=2&q=1621213872938
- 情報通信研究機構研究報告「宇宙環境計測・予測技術特集」（2021年10月発行）
  https://www.nict.go.jp/data/research-report/index.html

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。

御静聴ありがとうございました。