

宇宙天気三二講座

～電離圏編～

情報通信研究機構 電磁波計測研究所
宇宙環境インフォマティクス研究室
津川 卓也

Contents

- 電離圏の基礎知識
- 定常的な電離圏観測手法
- 中・低緯度における主な電離圏の現象とその電波伝播への影響

電離圏の基礎知識

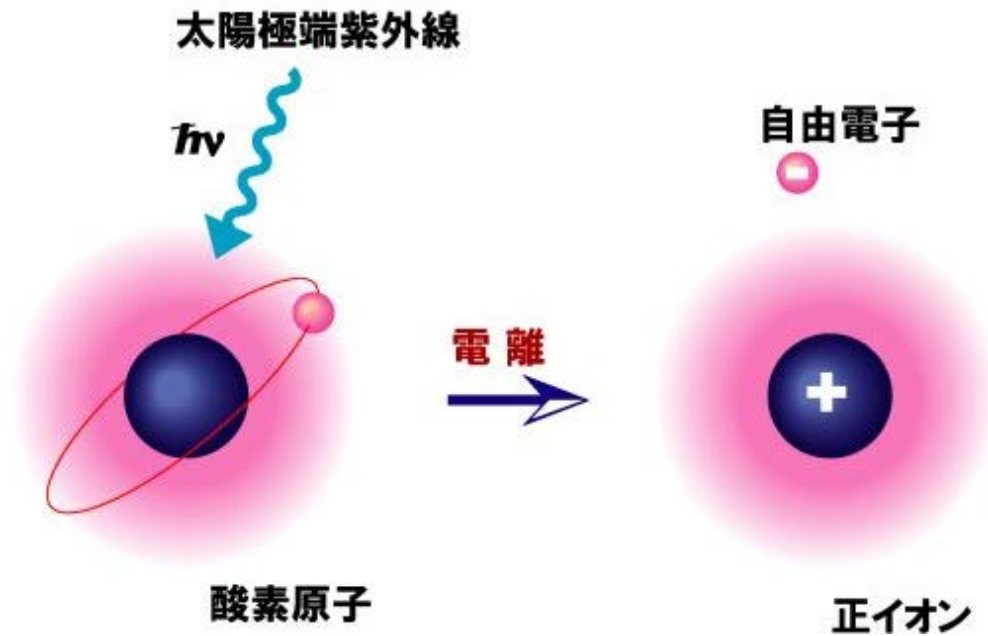
電離圏から見る地球



宇宙ステーションから撮影されたオーロラと大気光 [<http://eol.jsc.nasa.gov>]

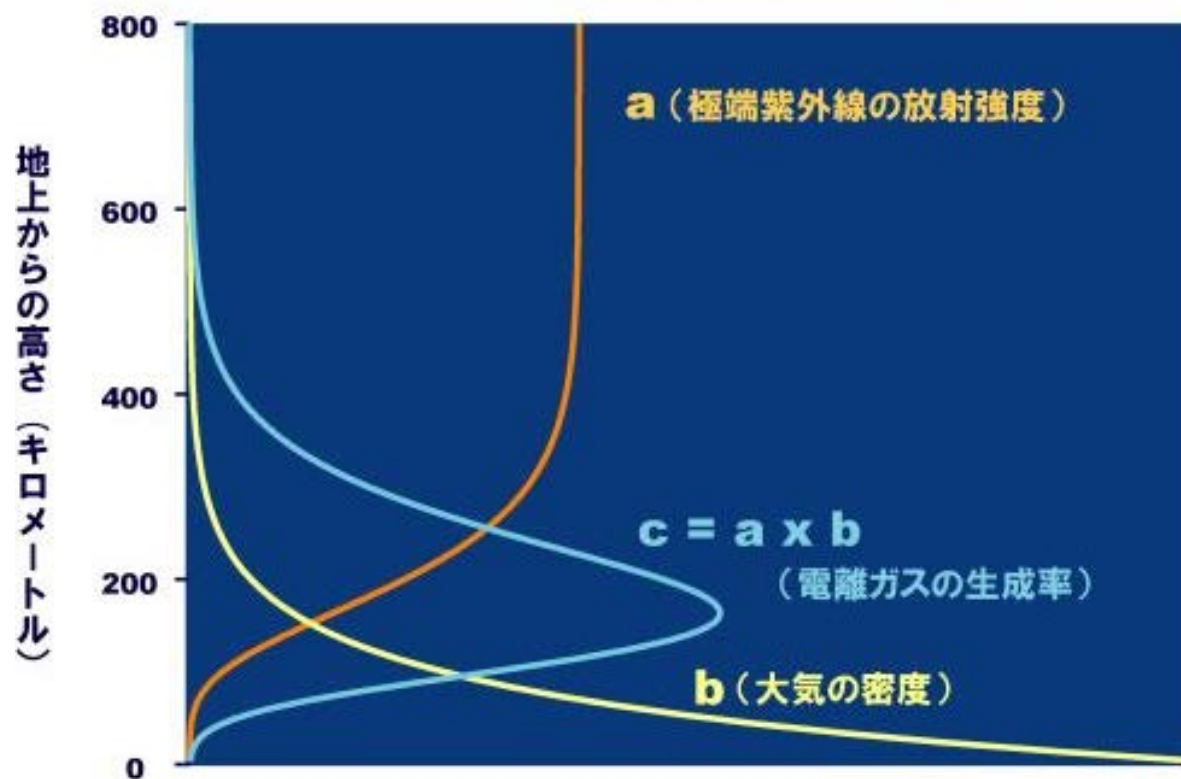
- 電離圏は、高さ300km付近の電離ガス（プラズマ）が濃い領域。
- 地球が直径1mとすると、電離圏は地表から約3cmのところに浮かぶ球殻。

大気の電離



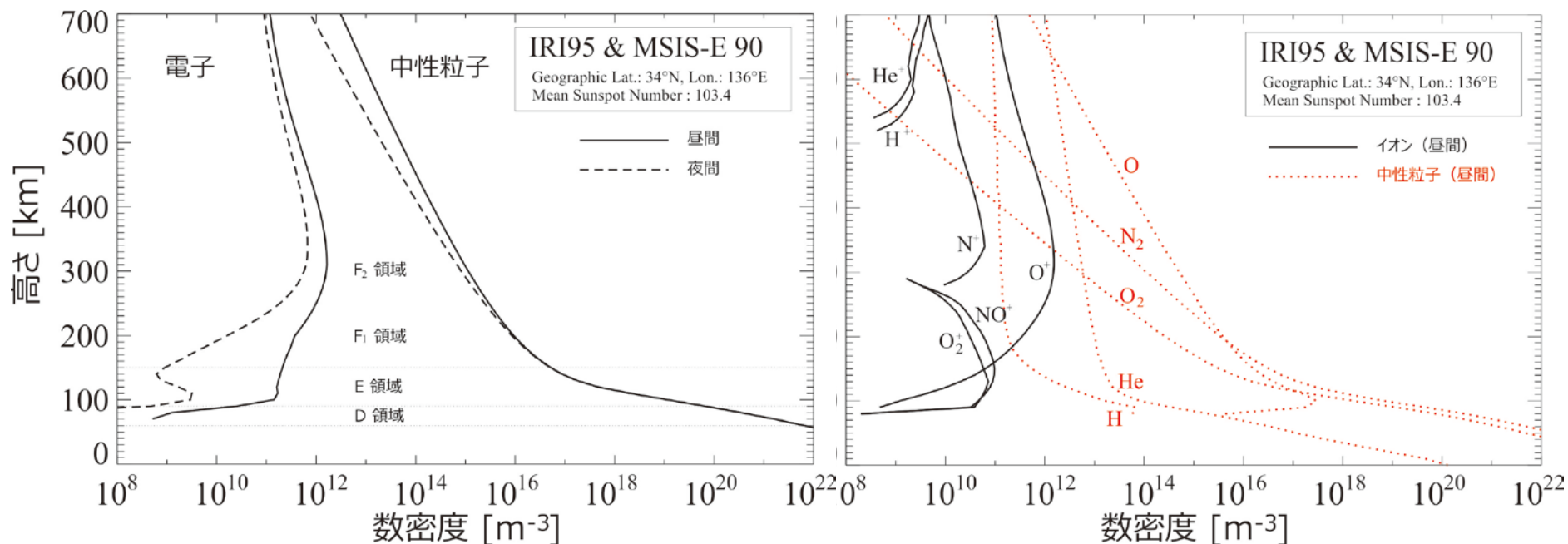
- 超高層の薄い大気（主に酸素原子）は、太陽の紫外線（エネルギーの高い極端紫外線）によって、原子から電子が飛び出してイオンになる。
- この作用を電離とよび、電子とイオンから成る気体は電離ガス（プラズマ）と呼ぶ。

電離圏の高さ



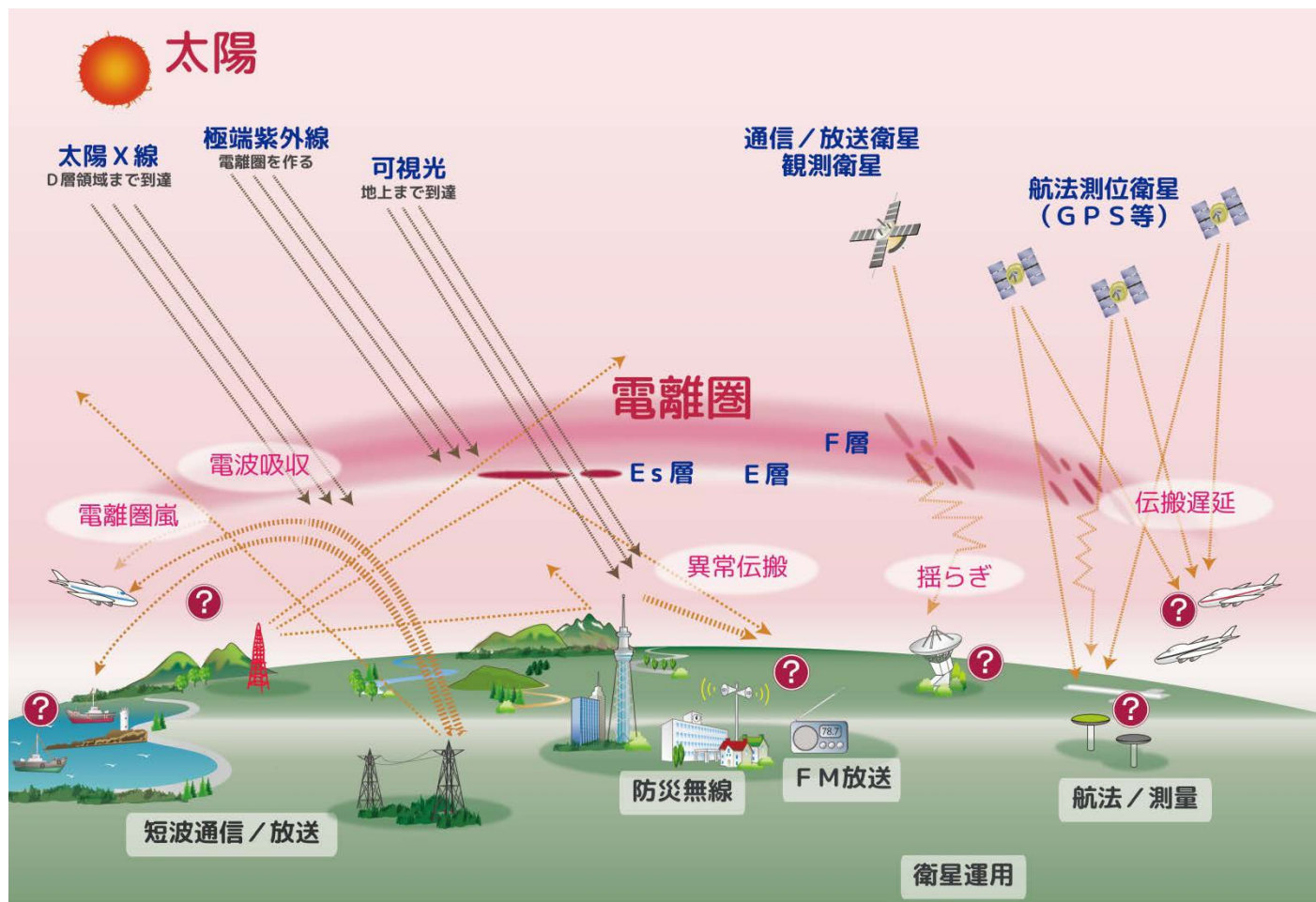
- 電離ガスが生成される割合は、電離されるガス（大気）の濃度と、電離を引き起こす極端紫外線の強さの掛け算で決まる。
- 地上から約200kmの高さに電離生成のピークができる。
- 電離ガスは磁力線に沿って拡散し、最終的に300km付近が電離圏のピークとなる。

電子密度と中性大気の高高度分布



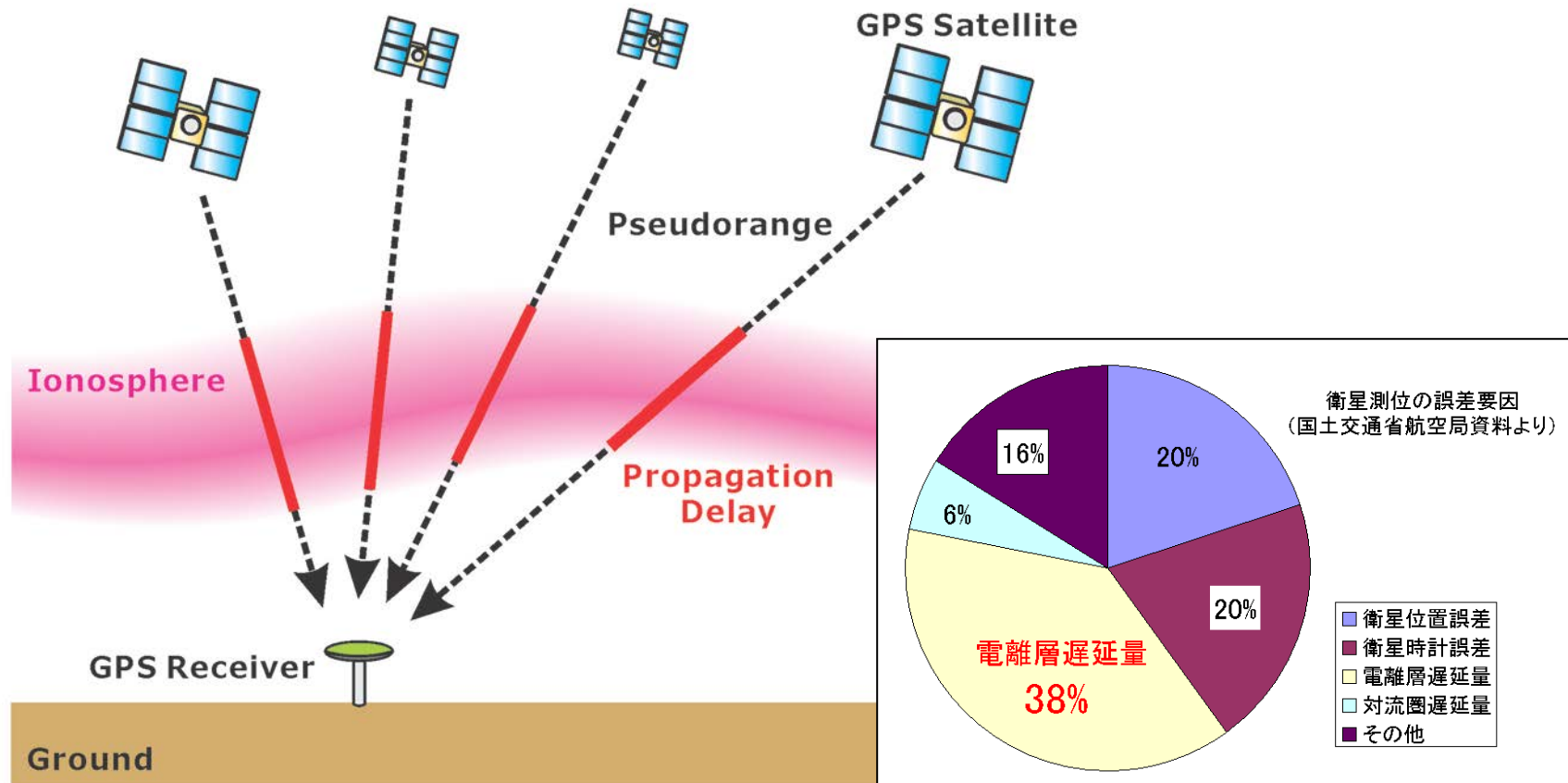
- 電離圏は、電子密度の違いによって下から「D領域」「E領域」「F領域」と名前がつけられている。F領域 (F₂領域) で電子密度が最大となる。
- 電離圏プラズマの電離率は、F領域でもせいぜい 0.1 %程度 (プラズマ 10^{12} 個/ m^3 、中性 10^{15} 個/ m^3) 。
- 中性大気の変動や組成の変化も、電離圏変動の大きな要因となる。

電波伝播と電離圏効果



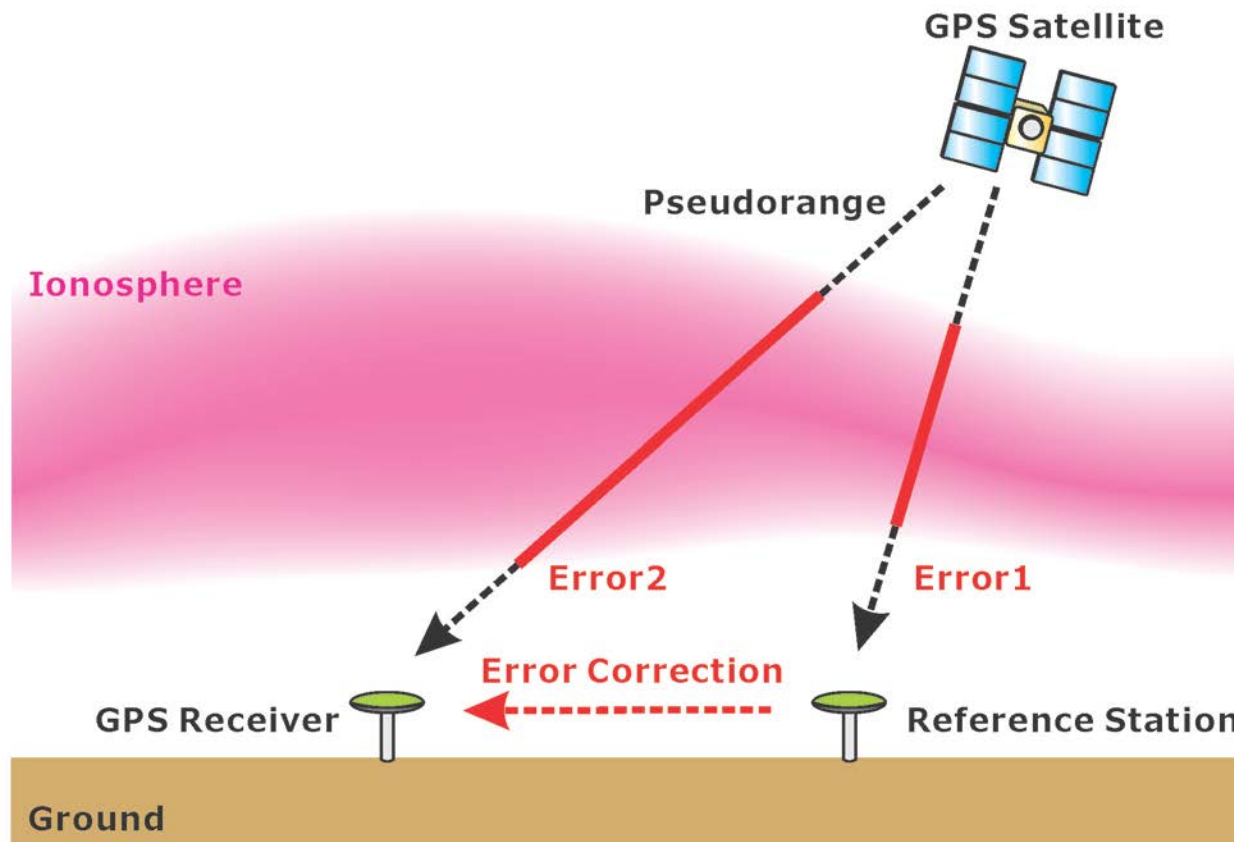
- 電離圏は地上－地上、地上－衛星間の通信・放送・測位など電波伝播に影響を与える。安定運用のためには、電波障害発生時の分析が必要。
- 障害発生時の原因の切り分けのために、電離圏の監視と予測が重要。

1周波GPS測位への電離圏の影響



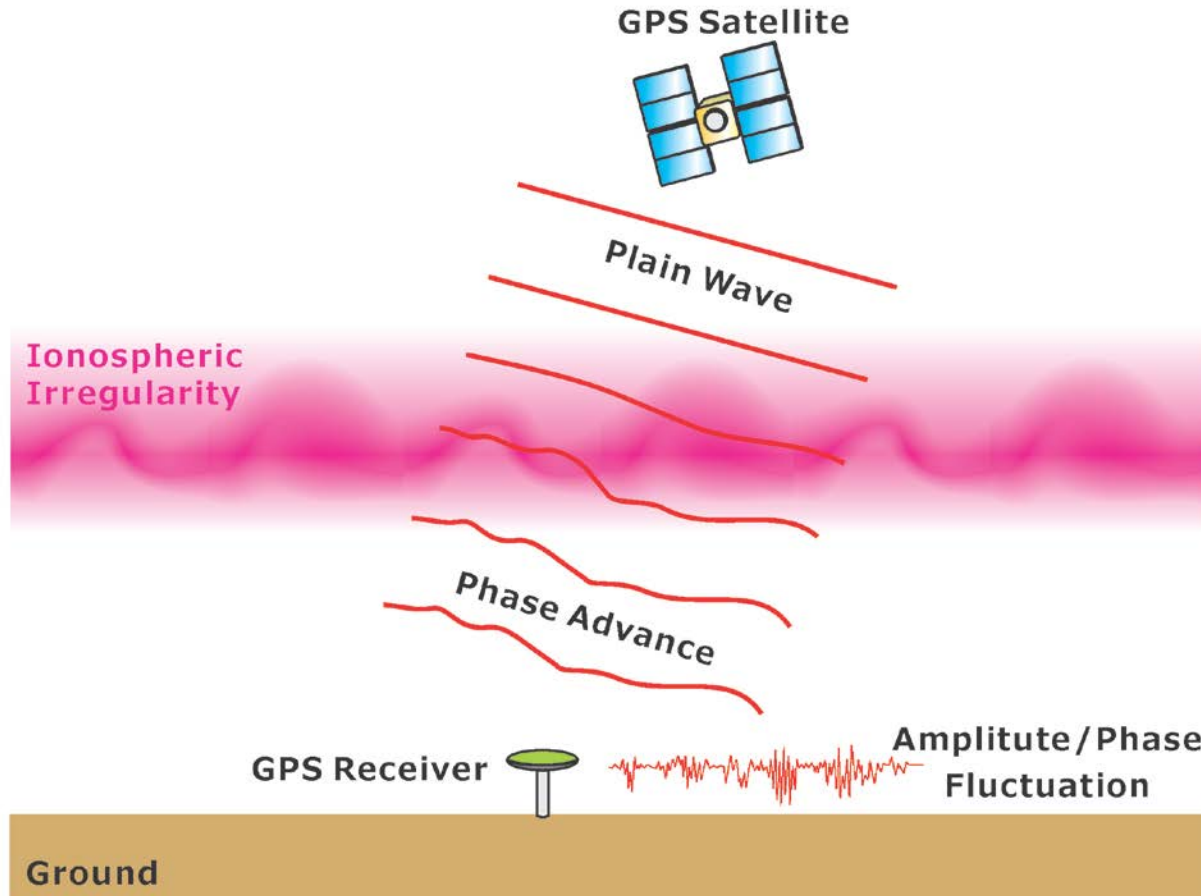
- 1周波GPS測位で利用される擬似距離には電離圏遅延量が含まれる。
- 電離圏遅延量は一般的な1周波GPS測位における最大誤差要因。

ディファレンシャルGPSへの電離圏の影響



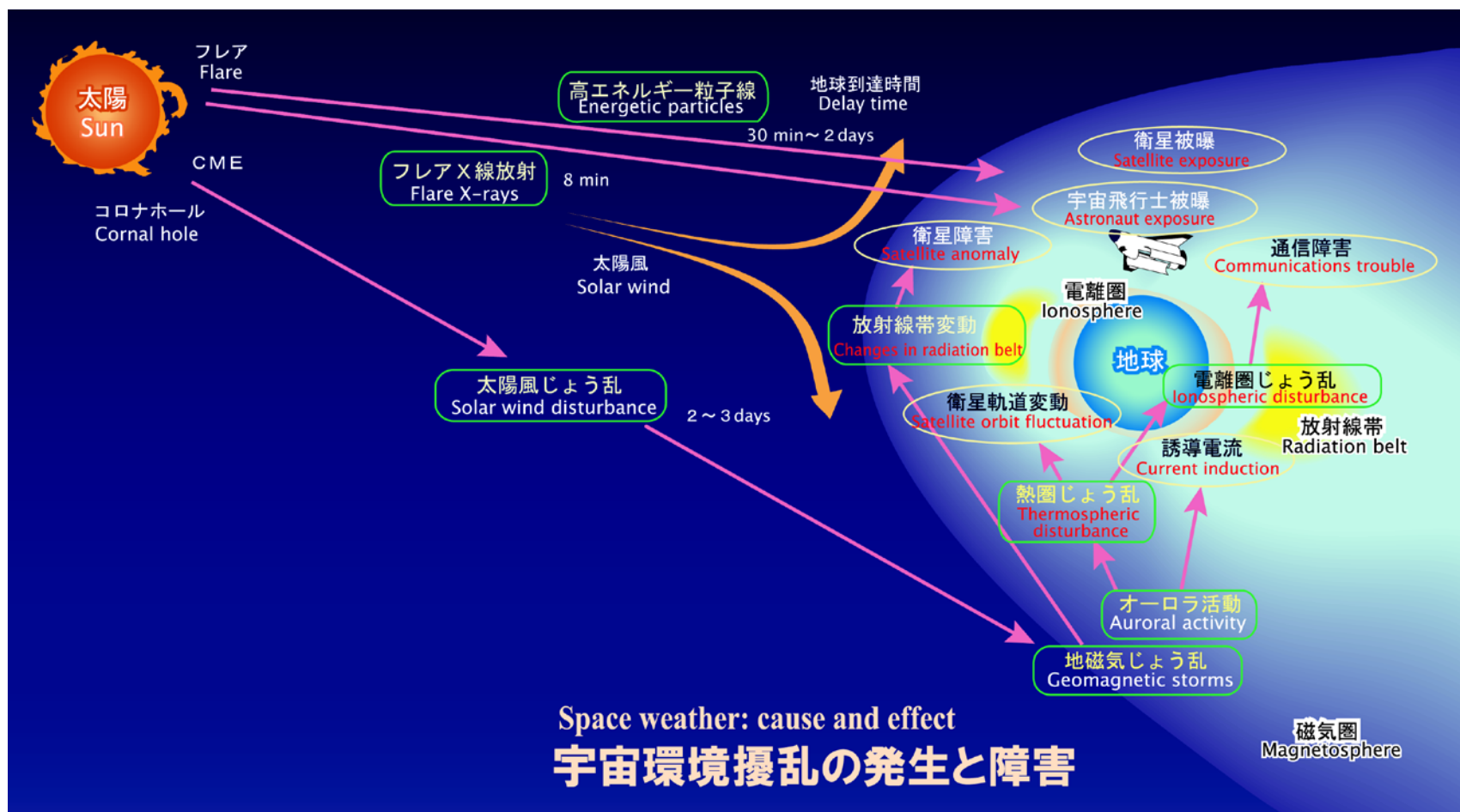
- 電離圏の電子密度構造に急峻な空間勾配がある場合、ディファレンシャルGPS（DGPS）の大きな誤差要因となる。

GPSシンチレーション



- 電離圏の電子密度に数100mスケールの強い不規則構造がある場合、GPSシンチレーションが発生し、GPS信号のロック損失に繋がる場合がある。

電離圏の上流：太陽・太陽風・磁気圏



- 電離圏の変動は、上流にあたる太陽・太陽風・磁気圏の影響が大きいですが、下層大気にも影響される。

定常的な電離圏観測手法

定常的な電離圏観測手法

- 定常的な電離圏観測手法として、世界的に広く使われている代表的なもの：

イオノゾンデ（1930年代～）

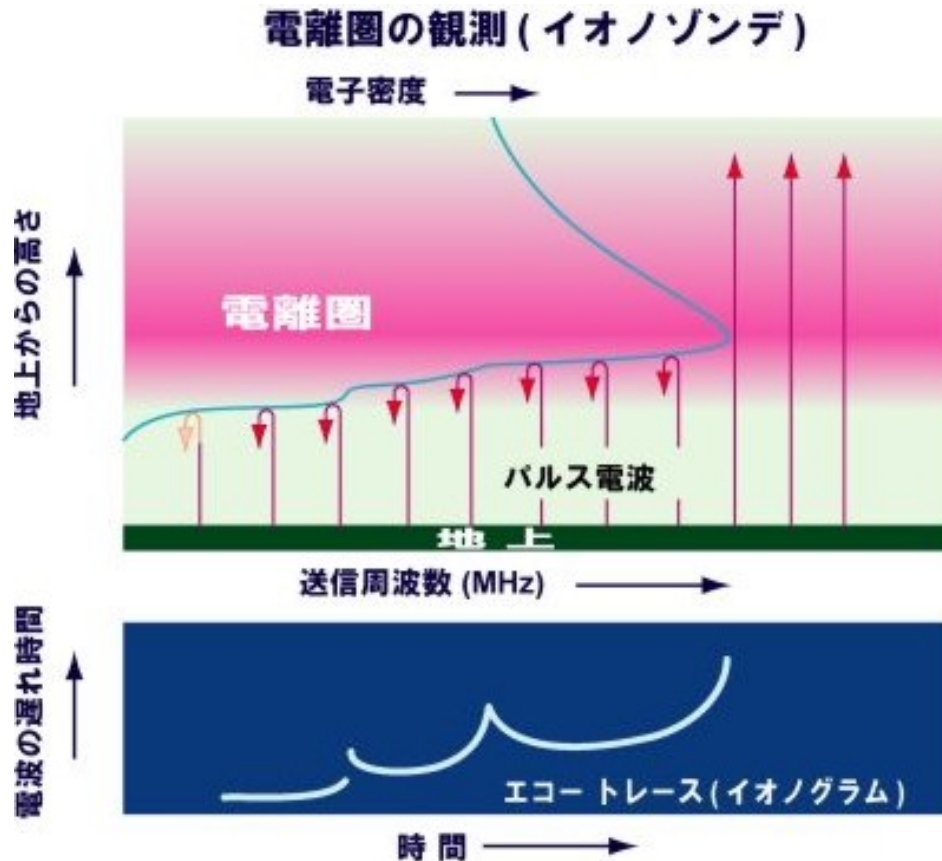
GPS受信機網（1990年代～）

宇宙天気予報に利用する電離圏観測手法

Workshop to Coordinate and Expand Ionospheric Services
(Boulder, Colorado, USA, Apr. 2010) での議論のまとめ。

研究機関	現在の観測手法	利用しているモデル
IPS, 豪州	イオノゾンデ、GPS-TEC、シンチレーション	内挿/経験モデル
KASI, 韓国	VHFレーダ、GPS-TEC、大気光	CMIT or TIEGCM
RRA, 韓国	イオノゾンデ、GPS-TEC	IRI
GAC, ドイツ	GPS-TEC、シンチレーション、ビーコン、LEO衛星	Several TEC models
NPL, インド	イオノゾンデ、GPS-TEC、トモグラフィ受信機網	TEC予測、HF伝搬予測等
HMO, 南ア	イオノゾンデ、GPS-TEC	IRI
NOAA, 米国	イオノゾンデ、GPS-TEC	USTEC、D領域吸収予測、 STORM、CTIPe
RO, ベルギー	GPS-TEC	GIM、IRI
RWC, カナダ	磁力計、イオノゾンデ、GPS-TEC、リオメータ、HF送受信機	—
SEPC/CAS, 中国	GPS-TEC、シンチレーション	TECモデル、IRI等
NSWC/CMA, 中国	GPS-TEC	TEC統計モデル
BSWP, ブラジル	イオノゾンデ、GPS-TEC、VHFレーダ、大気光	SUPIM
NICT, 日本	イオノゾンデ、GPS-TEC	ANN

電離圏の観測：イオノゾンデ



- イオノゾンデは地上から周波数を変えながら上空に電波を発射し、電離圏からのエコーの時間を計測することにより、電子密度の高度分布を観測する。

国内定常観測（4地点）及び南極観測

電離圏観測施設



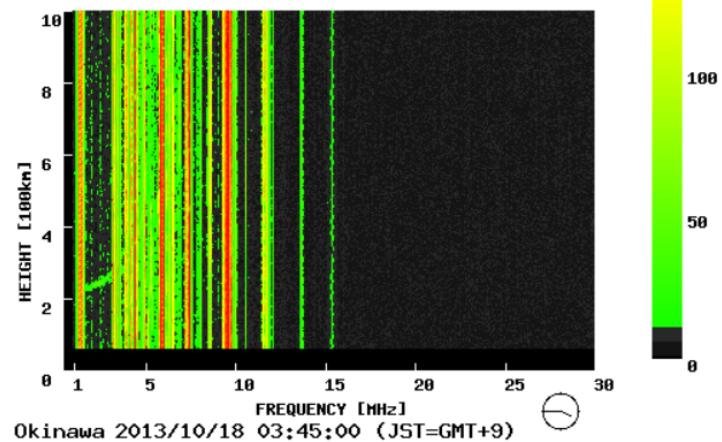
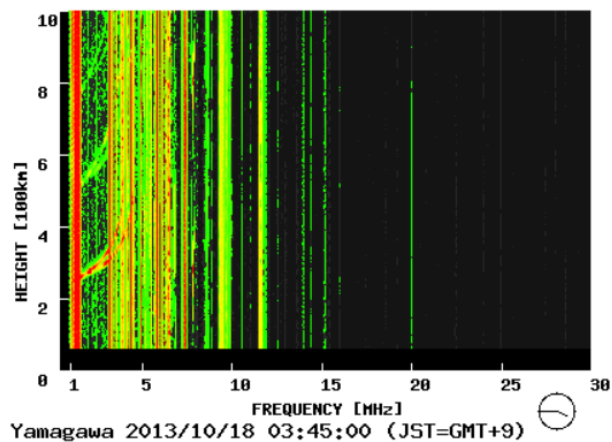
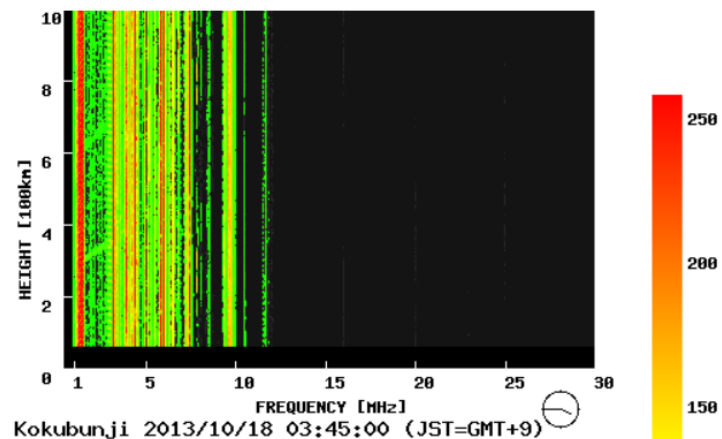
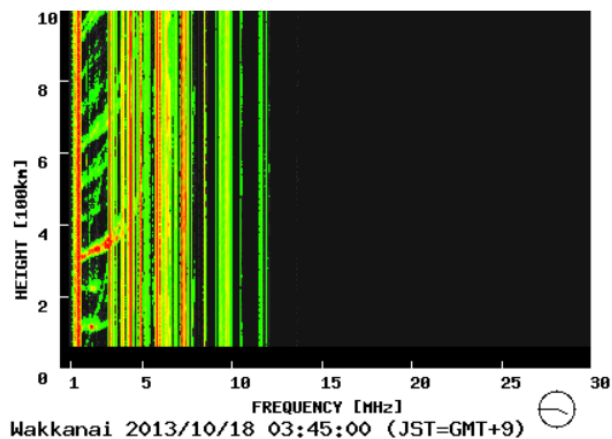
- 1937年開始、1957年より定常観測
- 観測周期: 定常 15分, 要望により5分モード
- 当初5観測所で始めたが、秋田は1993年に終了
- 沖縄観測所は2001年に中城（なかぐすく）から大宜味に移設
- 稚内観測所は2009年にサロベツに移設
- 現在すべての観測は国分寺から制御しており、各観測拠点は無人化

国内4観測点 最新イオノグラム

NICT 電磁波計測研究所 宇宙環境インフォマティクス研究室
電波伝搬障害研究プロジェクト

ホーム 電離圏概況 リアルタイムデータ データアーカイブ 電離圏とは? 南極準備室 アクセス リンク メンバー

携帯版 (QR) | English

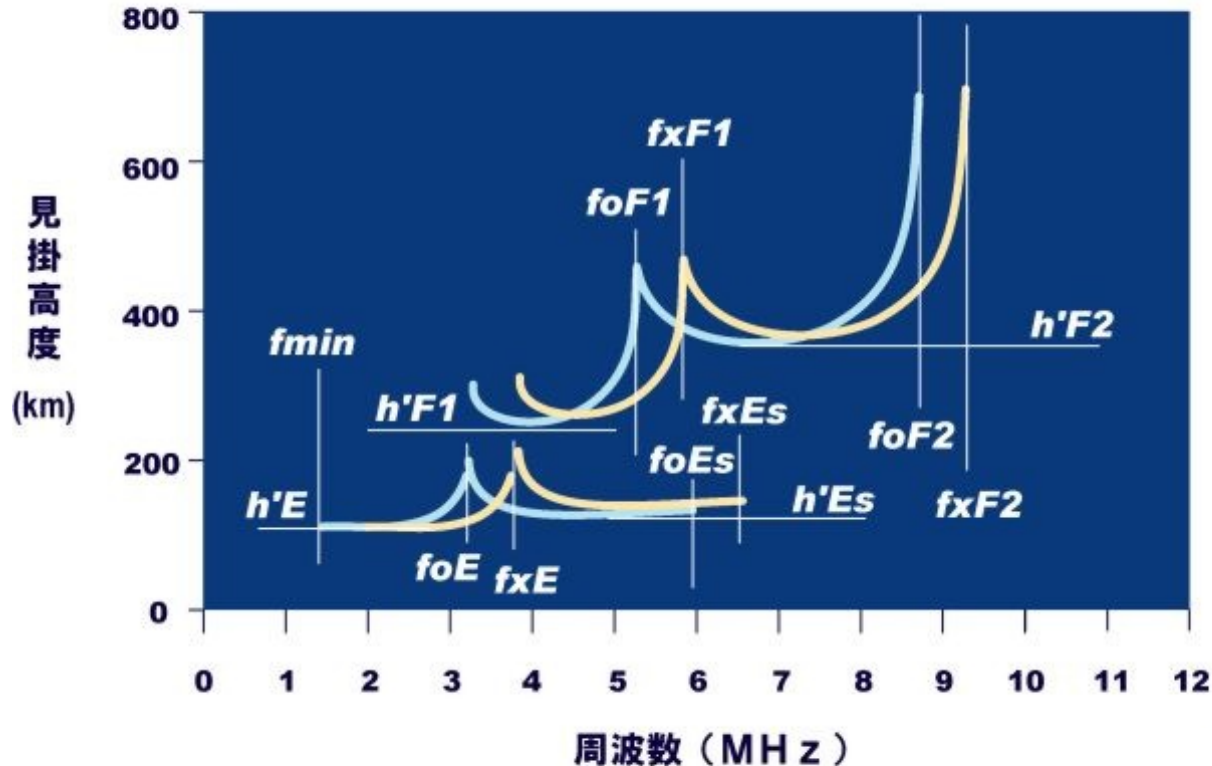


<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>

タブ [リアルタイムデータ] - [最新イオノグラム]

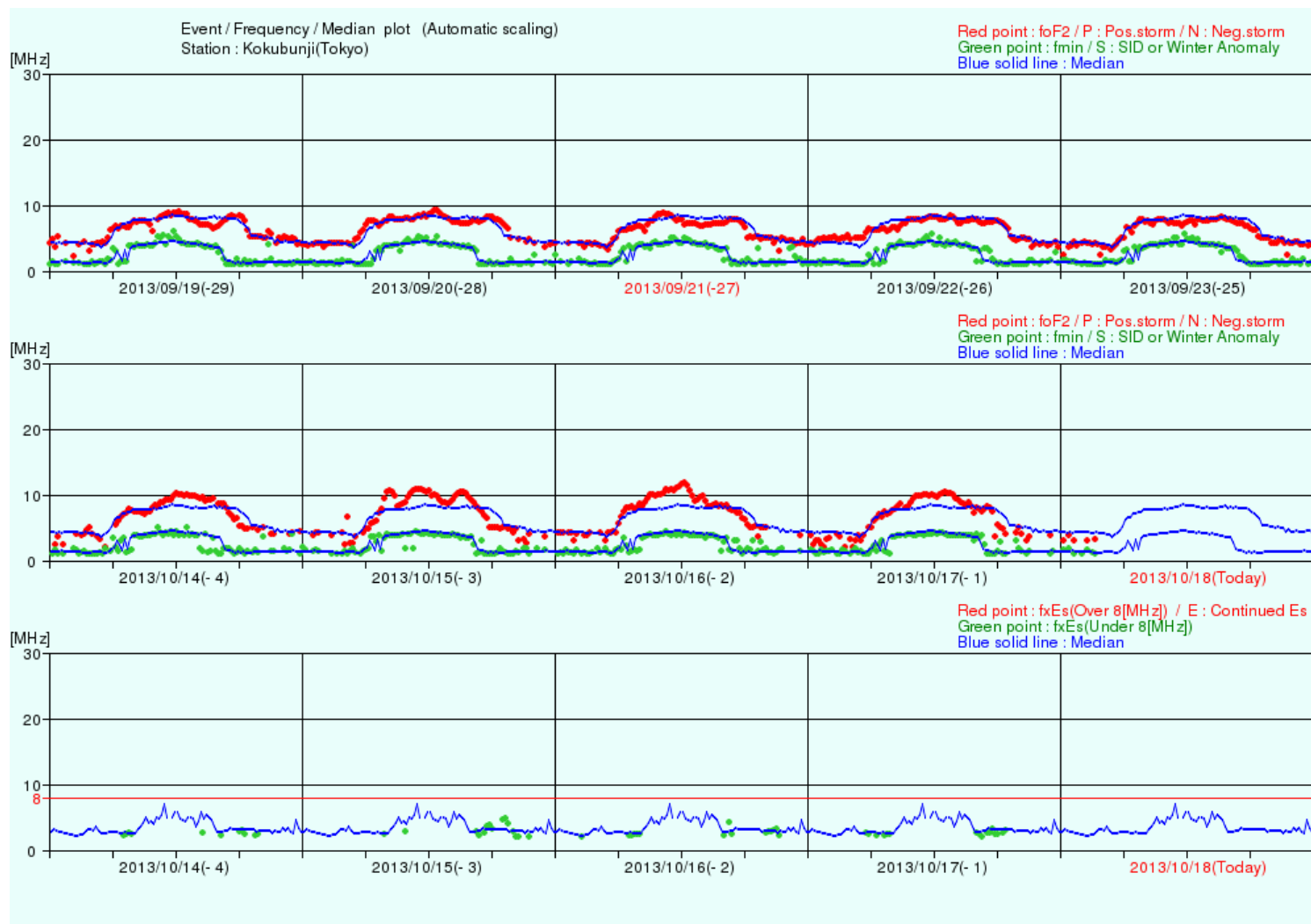
イオノゾンデ観測データ：イオノグラム

イオノグラムと電離圏パラメータ



- この図はイオノグラムにすべてのエコーレースが現れた場合の代表的なパターン。
- 実際には、これらのトレースのいくつかがその時々条件(季節・時間等)によって様々な形に現れる。
- イオノグラムから主要な電離圏パラメータを読み取り、電離圏の時間変化を捉える。

イオノグラム自動読み取り値



<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>

タブ [電離圏概況] - [概況詳細]

サマリイオノグラム

電磁波計測研究所 宇宙環境インフォマティクス研究室
電波伝搬障害研究プロジェクト

ホーム 電離圏概況 リアルタイムデータ データアーカイブ 電離圏とは? 南極準備室 アクセス リンク メンバー

携帯版 (QR) | English

Vertical Summary Viewer

Class:

All layer of:

- ☐ Wakkanai ☒ Kokubunji
☐ Yamagawa ☐ Okinawa

All observatories:

- ☐ F layer ☐ E layer
☐ All frequency

Interval:

- ☐ 15sec ☐ 30sec
☐ 1min ☐ 5min
☒ 15min

Date:

YYYY MM DD

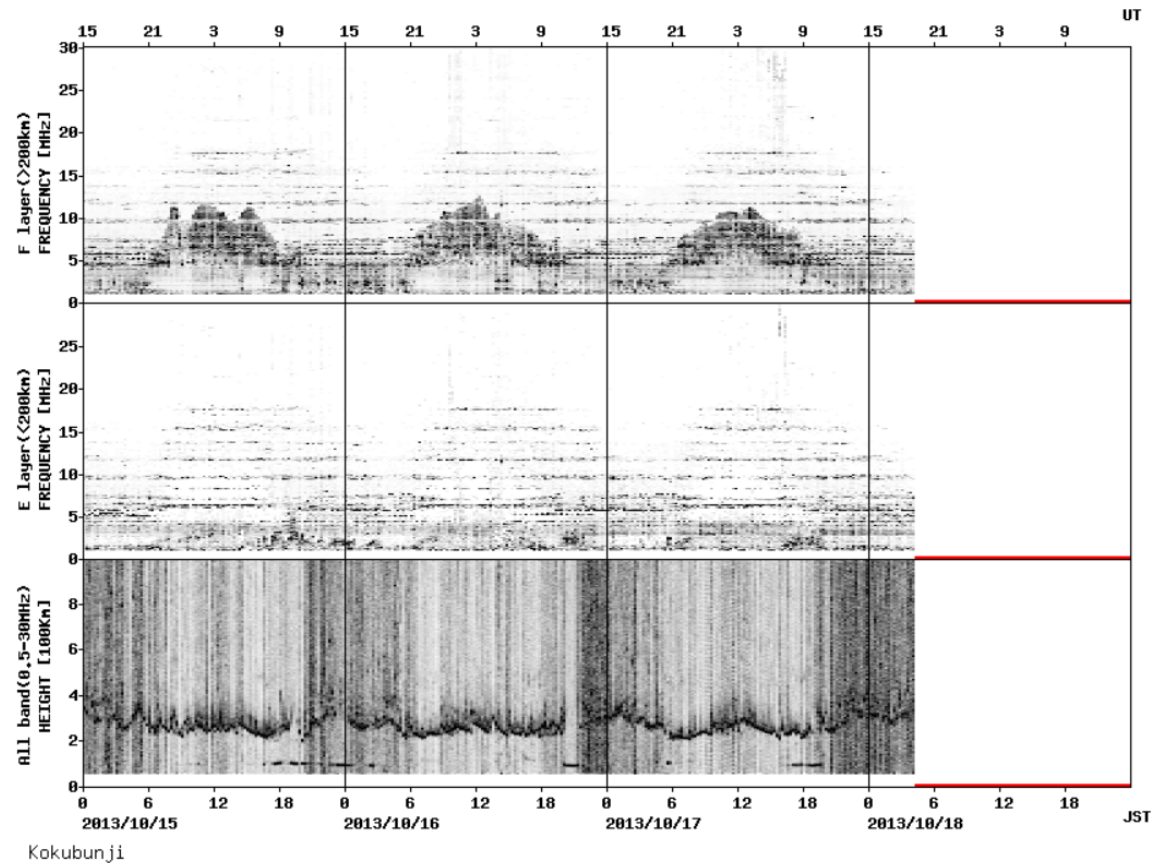
/ /

hh mm ss

: :

Action:

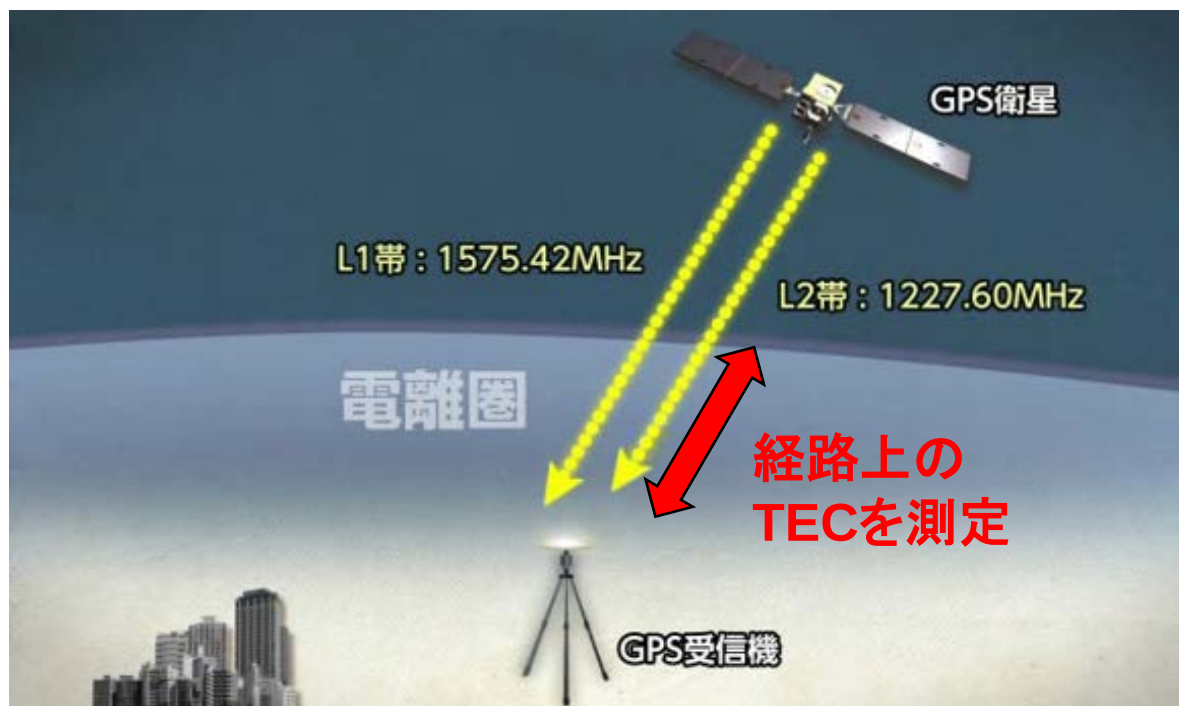
F、E領域臨界周波数、
電離圏高度の時間変
化を見るのに便利。



<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>

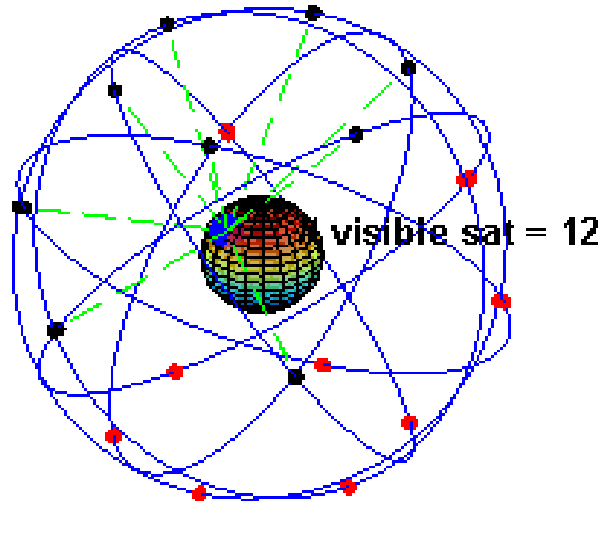
タブ [データアーカイブ] - [イオノゾンデ定常観測] - [サマリイオノグラム]

GPSによる電離圏全電子数（TEC）観測

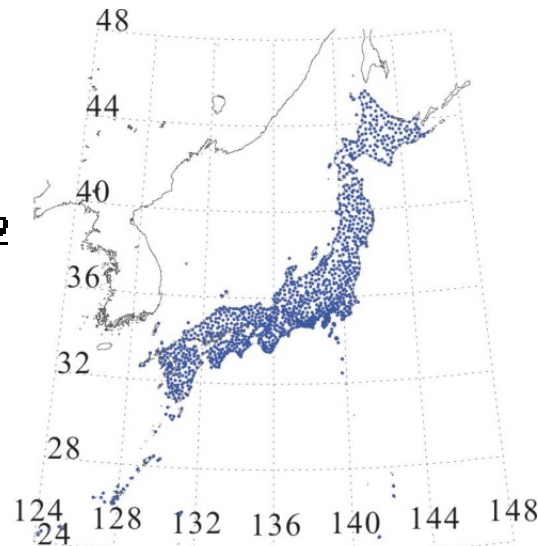


- 電離圏を通過する電波は、伝播経路上の電子の総数と電波の周波数に依存して、速度に違いが生じる。
- この性質を利用し、GPS受信機と衛星を結ぶ経路に沿って積分した単位面積当たりの**全電子数（TEC）**を測定する。
- TECは単位面積を持つ鉛直の仮想的な柱状領域内の電子の総数で、一般的に $\text{TEC Unit (TECU)} = 10^{16}/\text{m}^2$ で表される。

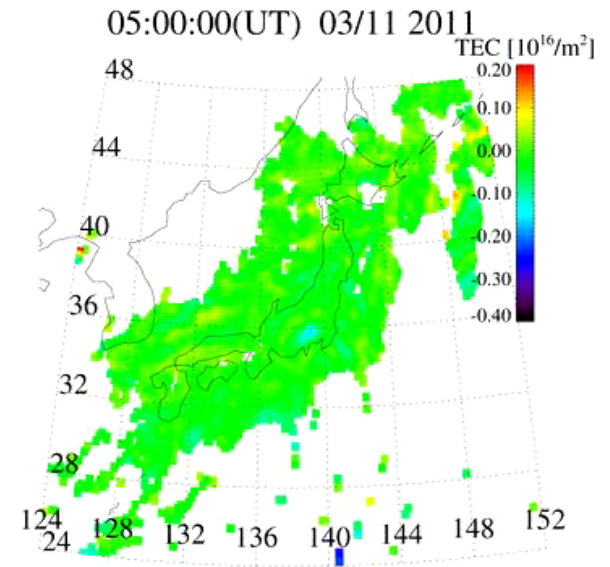
GPS受信機網による2次元TEC観測



GPS衛星の軌道と視野内衛星数
[from Wikipedia].



国土地理院GEONETのGPS受信機分布図(約1,240点)。

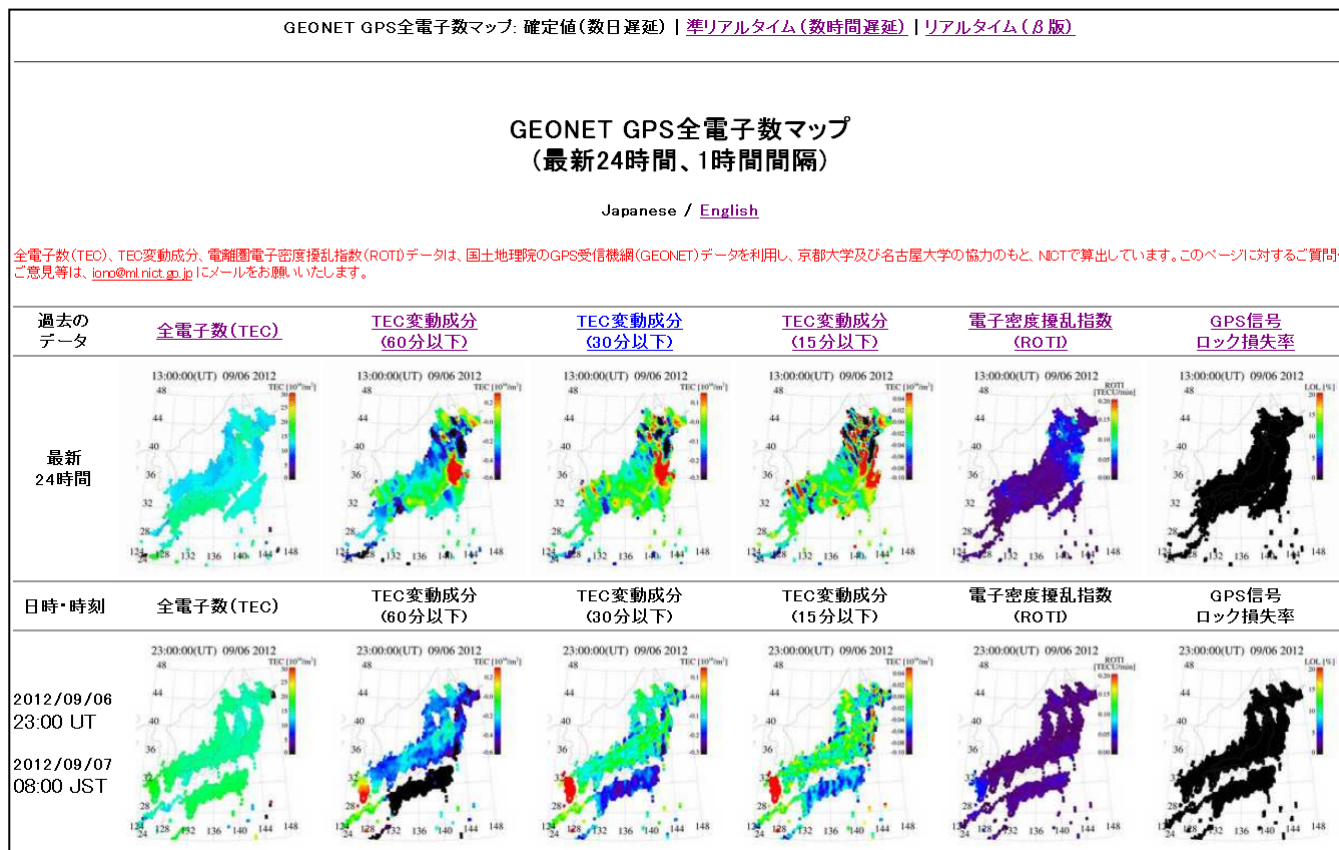


3.11東北地震後に観測された電離圏変動
(10分以下の変動成分)。

- 稠密なGPS 受信機網と視野内にあるすべてのGPS 衛星を用いることで、高い空間解像度で広範囲に面的な電離圏観測が定常的に可能である。
- NICTでは、約1,240点のGPS受信機網GEONETのデータを利用し、高時間・高空間分解能（時間分解能30秒、空間分解能 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ ）の定常的TEC観測を行っている。

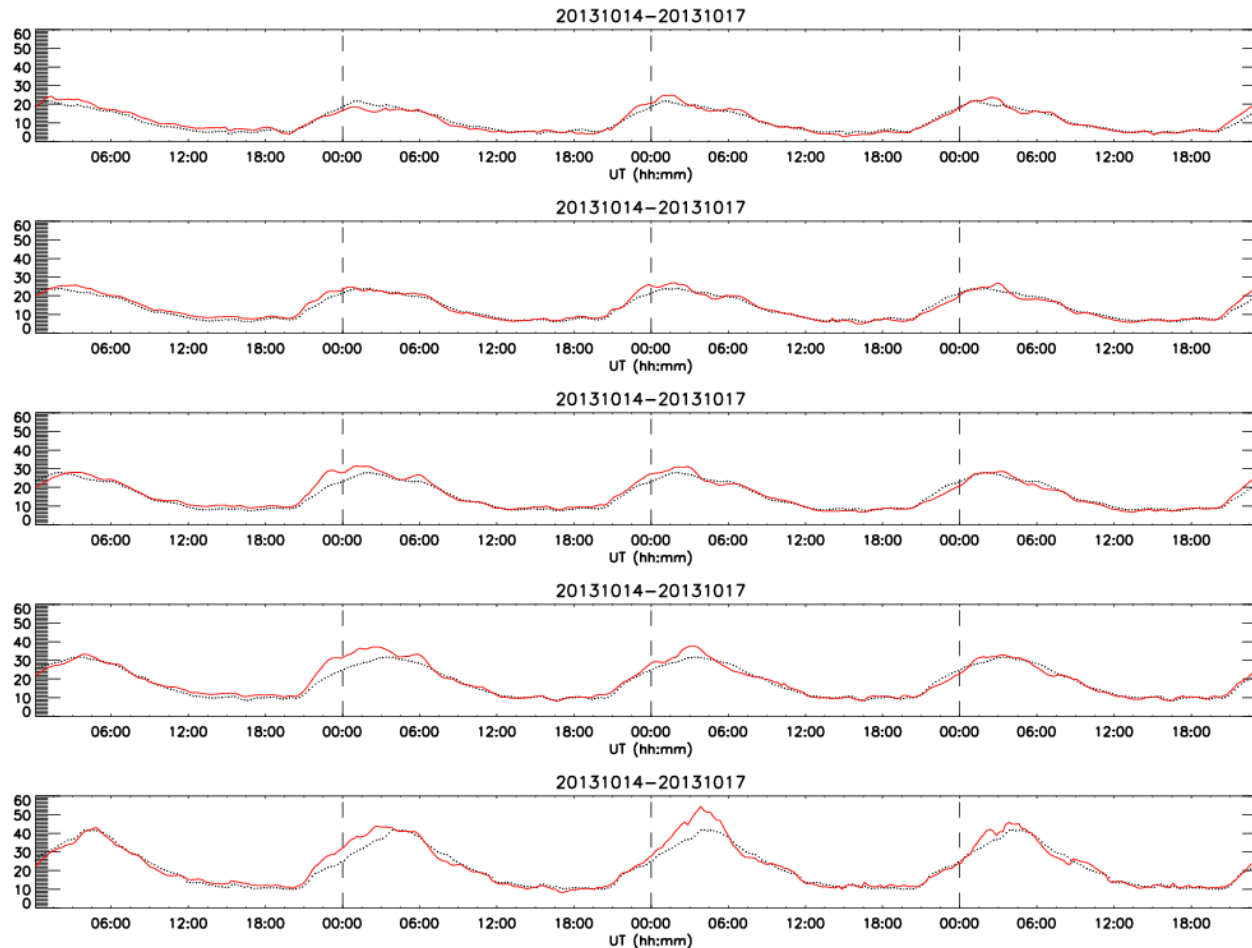
NICTにおける日本上空GPS電離圏観測

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



- NICTでは、GEONETの準リアルタイムデータを利用し、数時間遅れで日本上空のTECマップやGPSロック損失マップを算出・ウェブ配信している。
- 1997年から現在までのデータはデータベース化し、ウェブで閲覧可能。

緯度別TEC時間変化

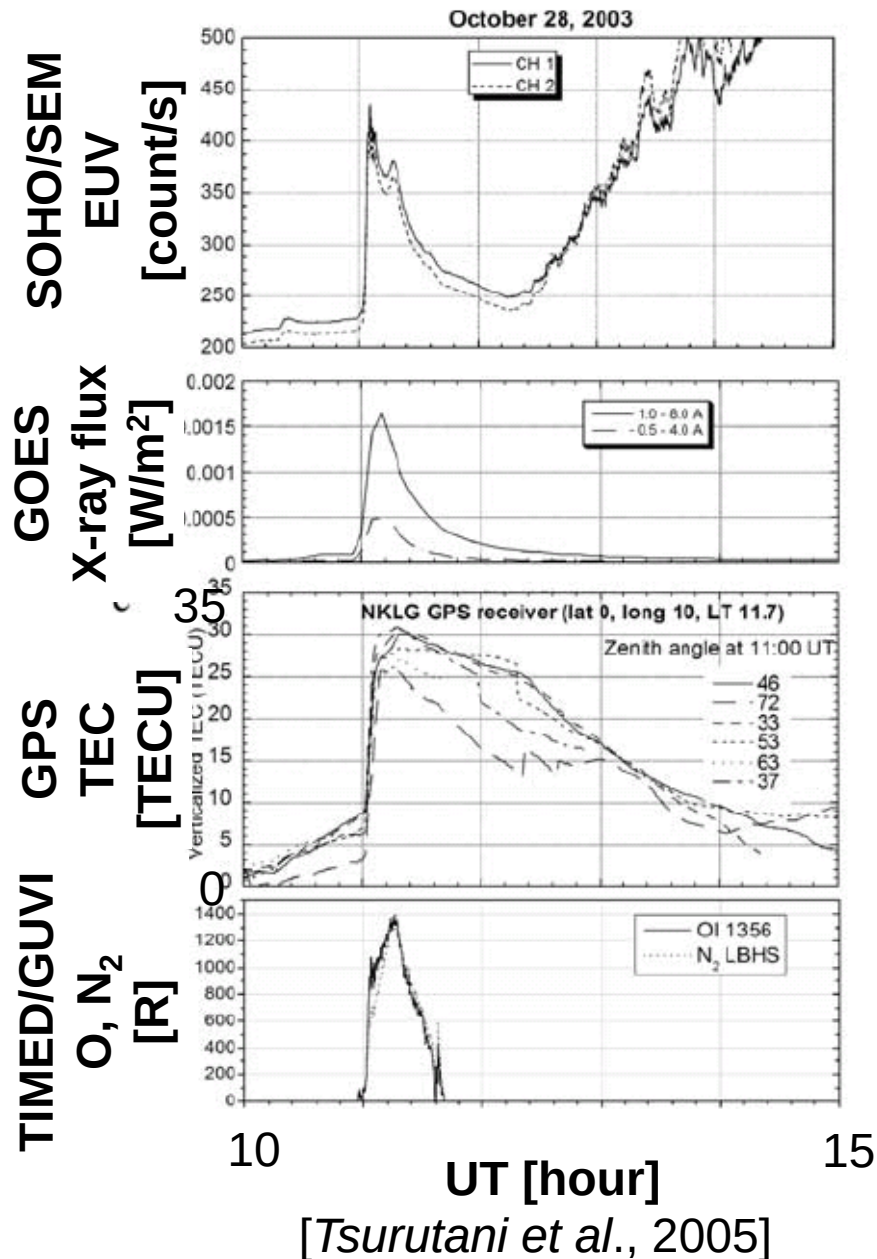


<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>

タブ [リアルタイムデータ] - [緯度別全電子数]

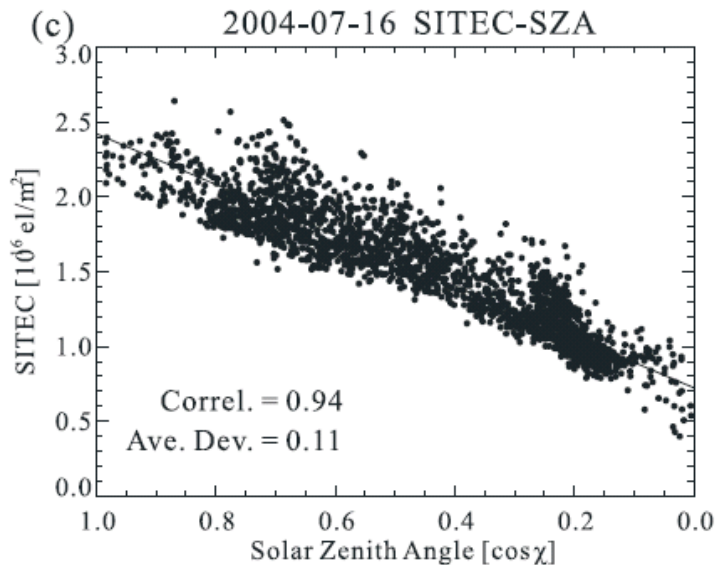
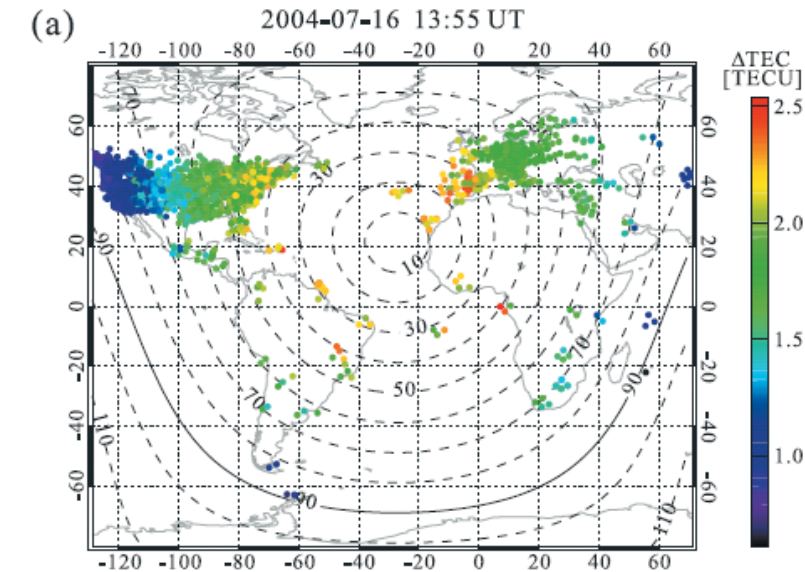
中・低緯度の主な電離圏現象

突発性電離圏擾乱 (SID)



- 太陽フレアに伴うX線や極端紫外線の放射増大により、電離圏が異常電離し、電子密度が急激に高くなる現象。
- 太陽フレア発生直後（光の速さで約8分後に地球に到達）から、数時間続く。
- 電子密度の増大量は、概ねフレアの規模（EUV放射量）と太陽天頂角に依存する。
- しばしばD領域異常電離により、デリンジャー現象も発生する。
- 電波雑音増大によりL帯のGPS信号ロック損失が発生する可能性も指摘されている。

突発性電離圏擾乱 (SID)



[Tsugawa et al., 2007]

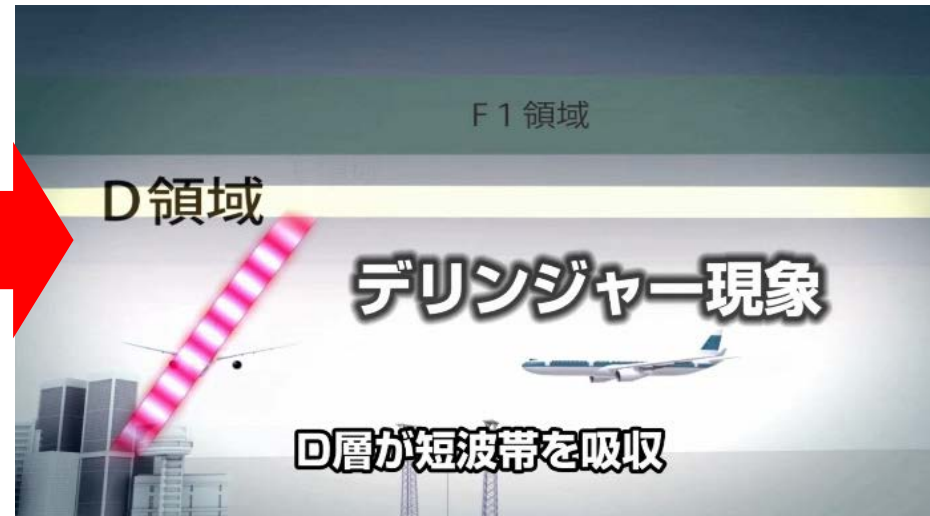
- 太陽フレアに伴うX線や極端紫外線の放射増大により、電離圏が異常電離し、電子密度が急激に高くなる現象。
- 太陽フレア発生直後（光の速さで約8分後に地球に到達）から、数時間続く。
- 電子密度の増大量は、概ねフレアの規模（EUV放射量）と太陽天頂角に依存する。
- しばしばD領域異常電離により、デリンジャー現象も発生する。
- 電波雑音増大によりL帯のGPS信号ロック損失が発生する可能性も指摘されている。

デリンジャー現象 (電離圏による短波異常減衰)

通常状態の短波伝播



太陽フレア発生時

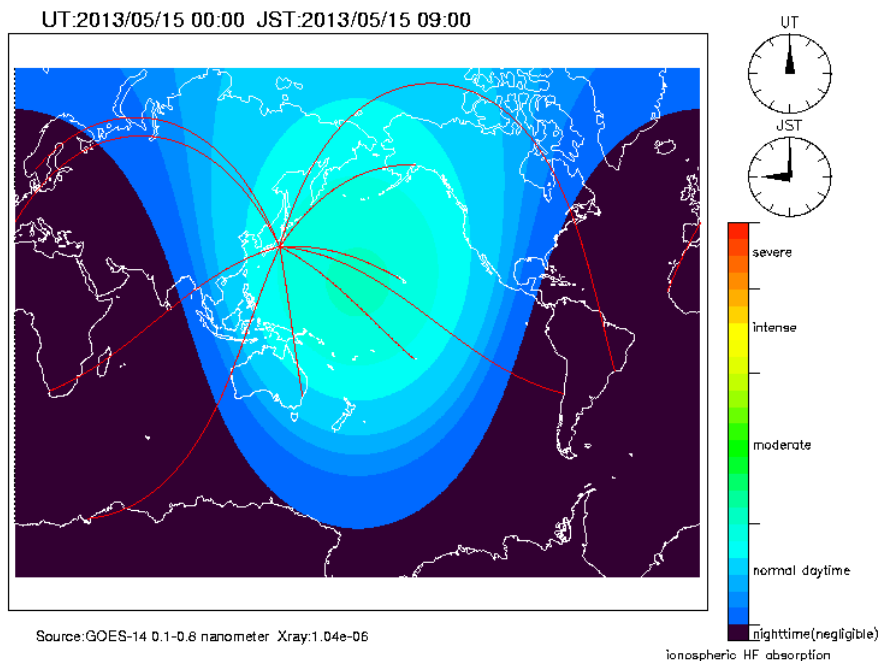


大規模太陽フレア (M5以上で顕著)

- 太陽 X 線量の急増
- 電離圏D領域の電子密度急増
- D領域での短波電波の吸収

観測データで見るデリンジャー現象

- 2013/05/15 X1.2フレア



GOES衛星による太陽X線観測
から計算された短波減衰マップ

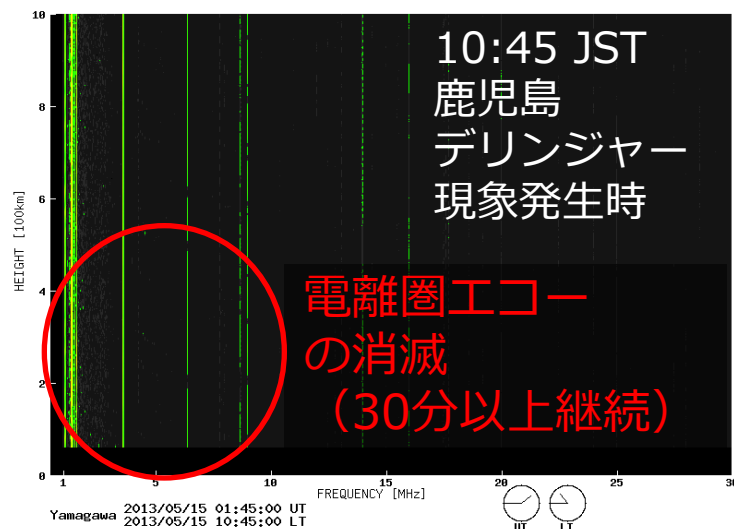
<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>

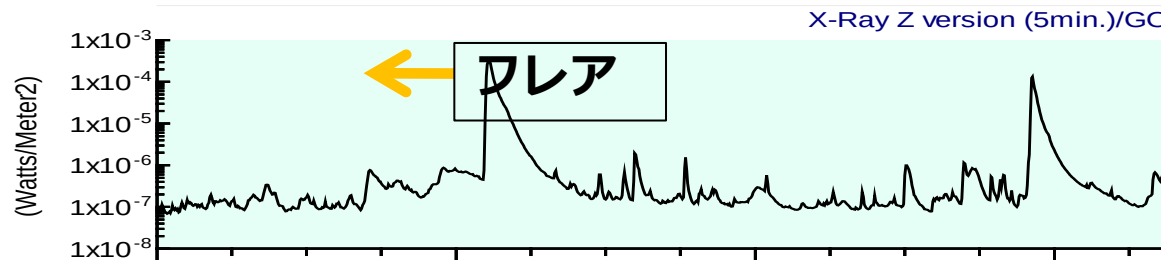
タブ [リアルタイムデータ]

- [デリンジャー現象]

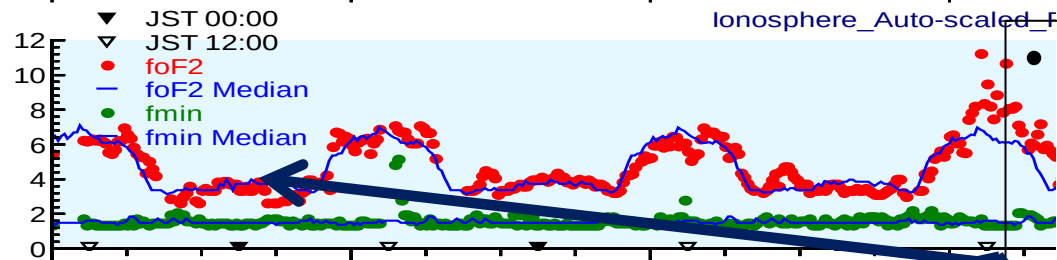
30 - [現況マップ]

鹿児島イオノゾンデ観測による
電離圏エコーの消滅



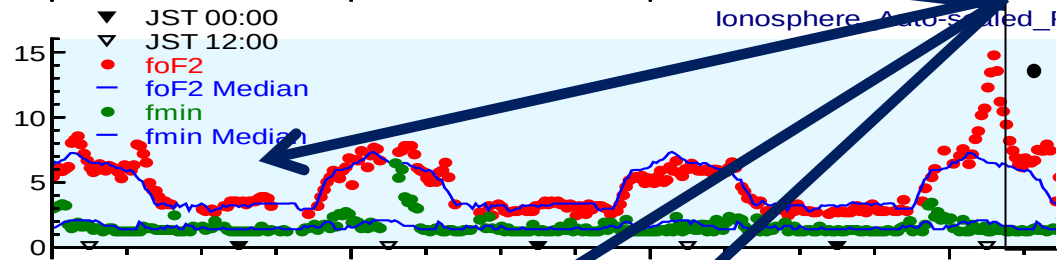


稚内



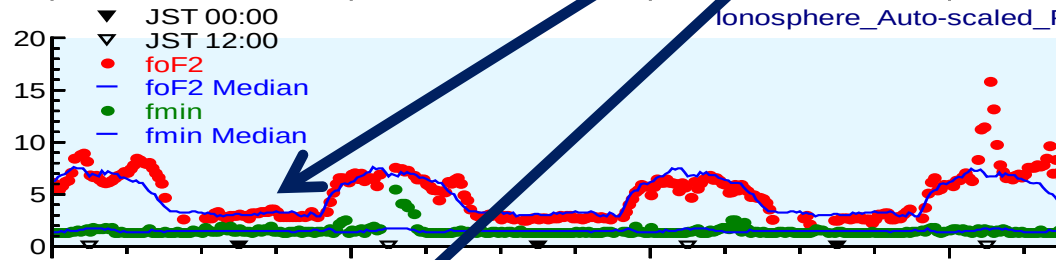
• イオノゾンデ観測での
反射最低周波数(fmin:
図中緑色の点プロット)
が上昇。

国分寺

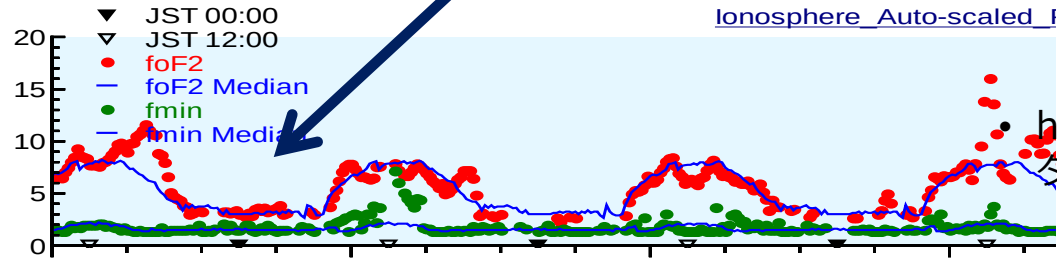


• 低い周波数の電波は吸
収されている事を示し
ている。

山川



沖縄



• <http://wdc.nict.go.jp/IONO/>
タブ[電離圏概況]
- [概要詳細]

突発性電離圏擾乱（SID）

振幅・規模	+ 数10TECU（～数m）まで フレア規模に依存
時間スケール	フレア直後～数時間
空間構造	全球規模 太陽天頂角に依存
その他の特徴	電波雑音増加によりGPS信号ロック損失する場合もある
影響	電離圏モデル誤差 → 単独GPS測位 デリンジャー現象 → 短波通信障害 GPSロック損失 → 単独GPS測位

電離圏嵐

負相嵐 (Negative Storm)

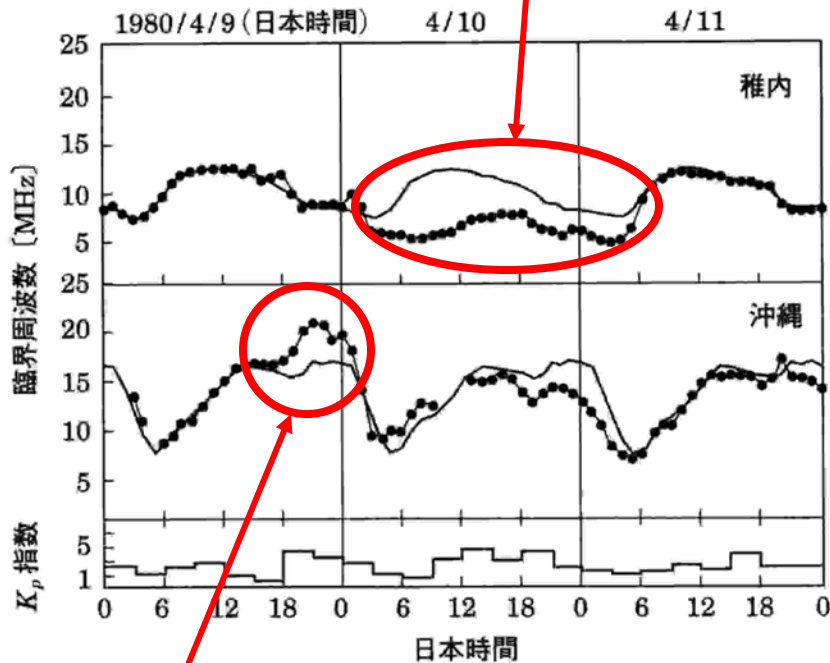


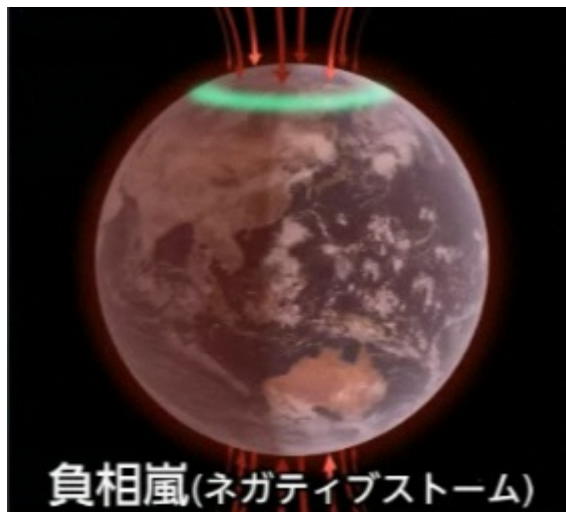
図 4・12 電離圏あらしの観測例

実線：1ヶ月平均の日変化

正相嵐 (Positive Storm)

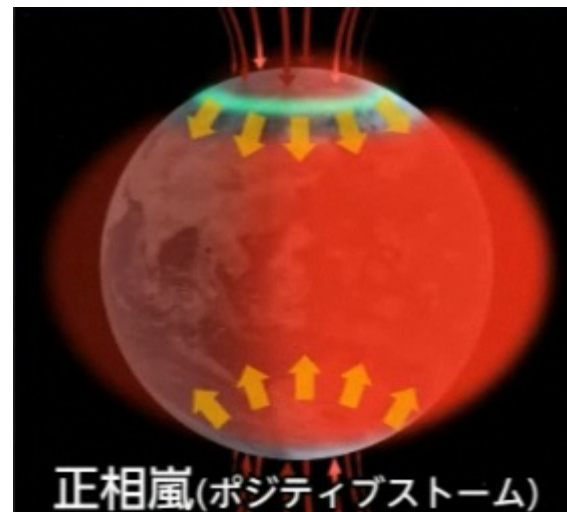
- 電離圏嵐とは、電離圏F領域臨界周波数 (foF2) や電子密度、全電子数等が、定常的な変動（一般的には日変化）から大きく外れる現象を言う。
- 電離圏F領域臨界周波数 (foF2)等が、定常状態よりも大きいとpositive storm、小さいとnegative storm と呼ぶ。
- 定常的・規則的な日変化は太陽放射による。
- 日本のような中緯度に見られる電離圏嵐の原因は、基本的には磁気嵐（太陽風と磁気圏の相互作用による）と考えられる。

電離圏嵐



負相嵐

- 通常よりも、顕著に電子密度が小さい時間が続く。
- 主に中性大気組成の変化によって起こり、正相嵐の数時間から一日程度遅れて発生することが多い。
- 高い周波数の電波が、F領域で反射されないため、短波通信が困難になることがある。

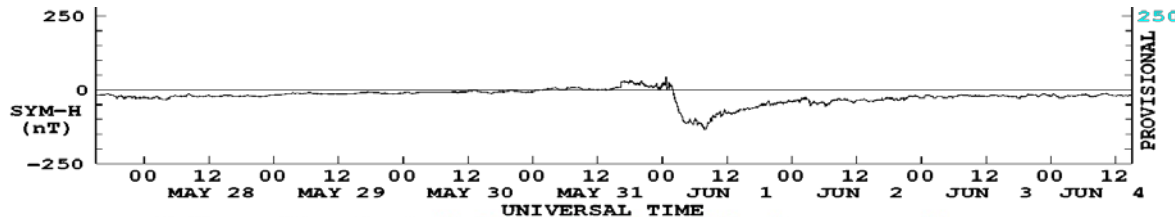


正相嵐

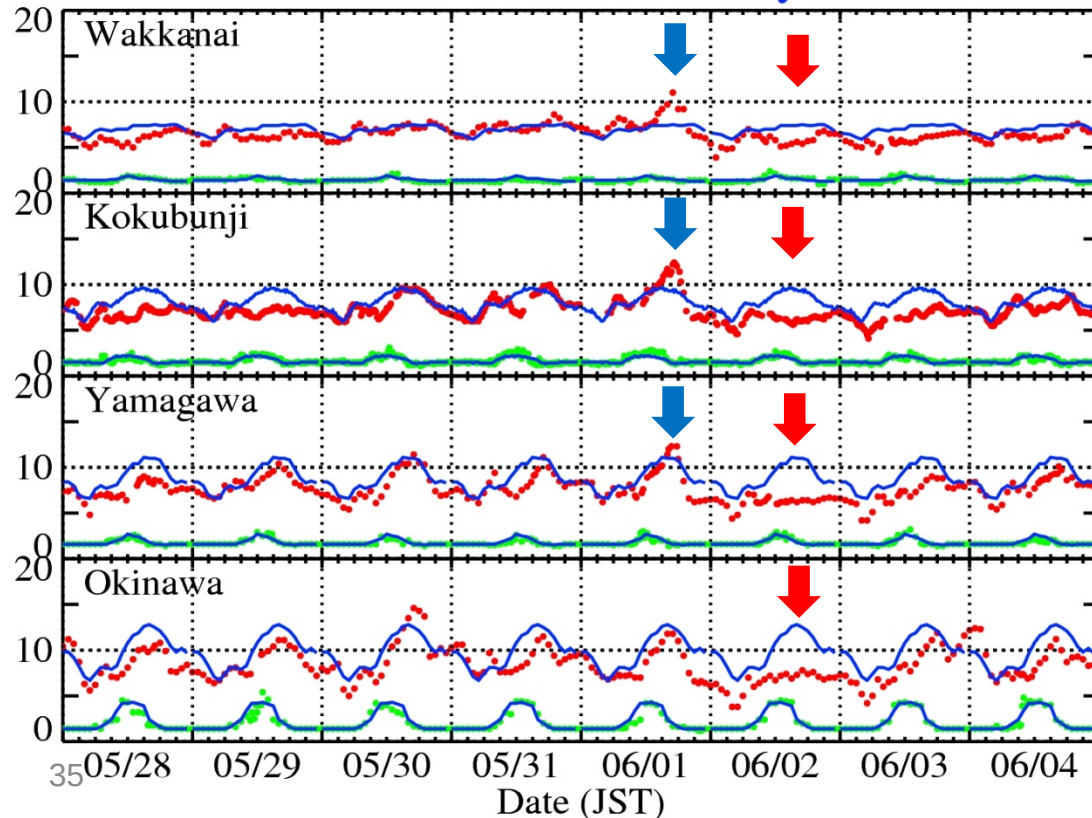
- 通常よりも、顕著に電子密度が大きい時間が続く。
- 主に昼の間に電離圏が、電磁気学的な力や赤道向きの風などによって、高高度に持ち上げられることで起こる。

観測データで見る電離圏嵐

- 2013年5月31－6月2日磁気嵐時の正相・負相電離圏嵐



[MHz] Man. Scaled foF2 / fmin / 40-day median

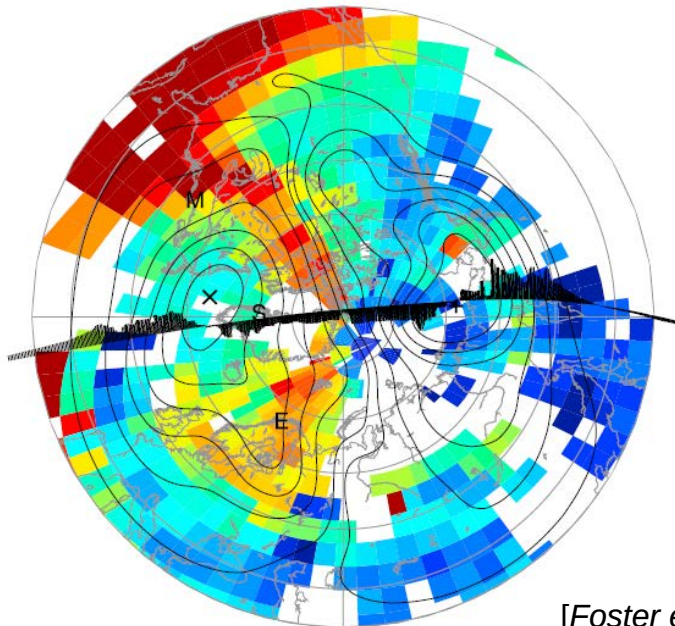
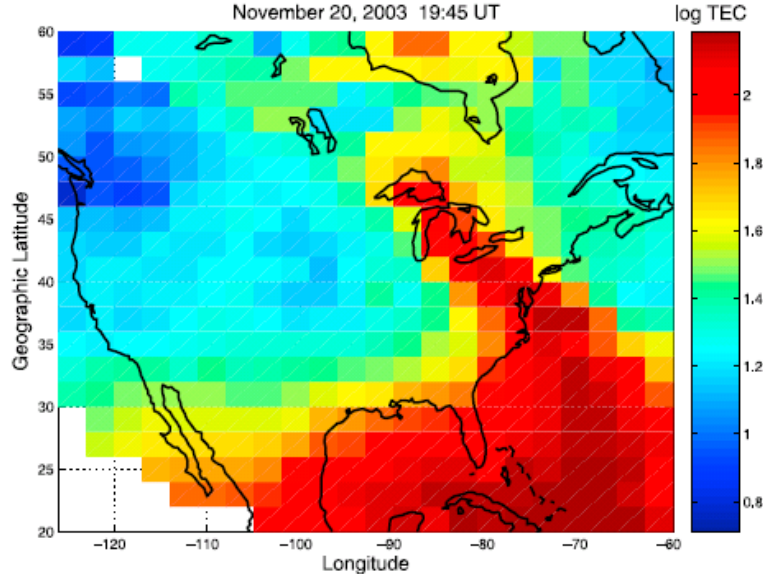


- 注：左図はウェブでは参照できません。
- このようなイオノゾンデ観測データは、
<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>
タブ[電離圏概況]
- [概要詳細]
で確認できる（過去40日分）。
- さらに過去のデータを参照したい場合は、
<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>
タブ [データアーカイブ]
- [イオノゾンデ定常観測]
- [サマリイオノグラム]
を参照する。

正相・負相電離圏嵐

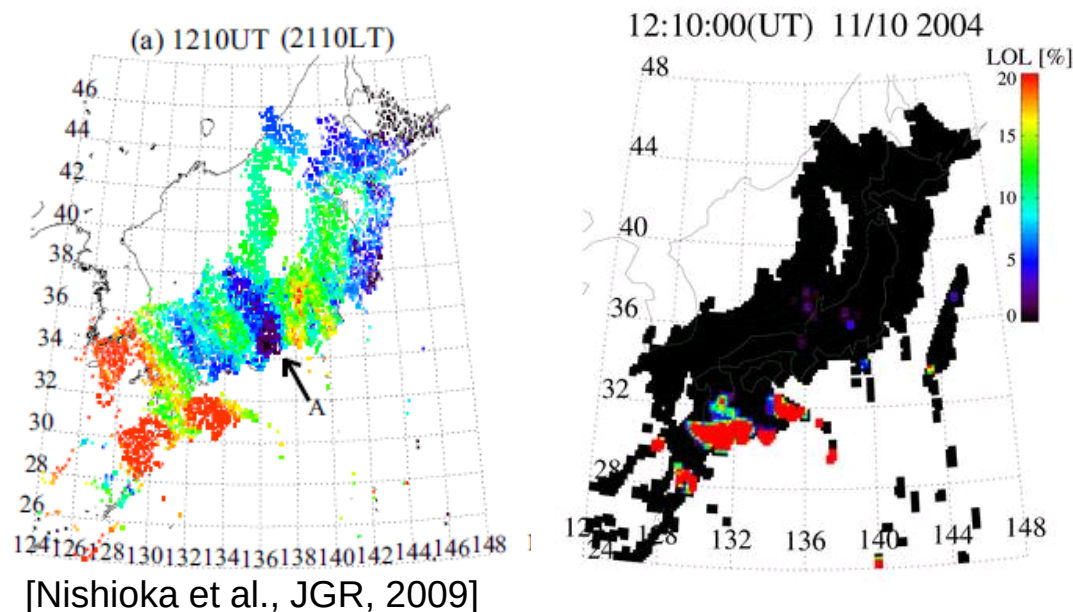
振幅・規模	～数10TECU（～数m） （静穏時からの比較）
時間スケール	数時間～数日
空間スケール	空間勾配は小さい
その他	基本的には磁気嵐に伴って発生する
影響	電離圏モデル誤差 →単独GPS測位

Storm Enhanced Density (SED)



- SEDとは磁気嵐に伴い低緯度の赤道異常プラズマが対流電場によって昼間側に流される現象
- SEDは太陽活動が活発な時期に起こりやすい。
- 前回活発期にはアメリカで10例ほど、日本で3例程度（余り頻繁ではない）
- 継続時間：数時間程度
- SEDの発生可能性は未解明（経度依存性がある可能性）

日本のGPS電離圏観測で捉えたSED

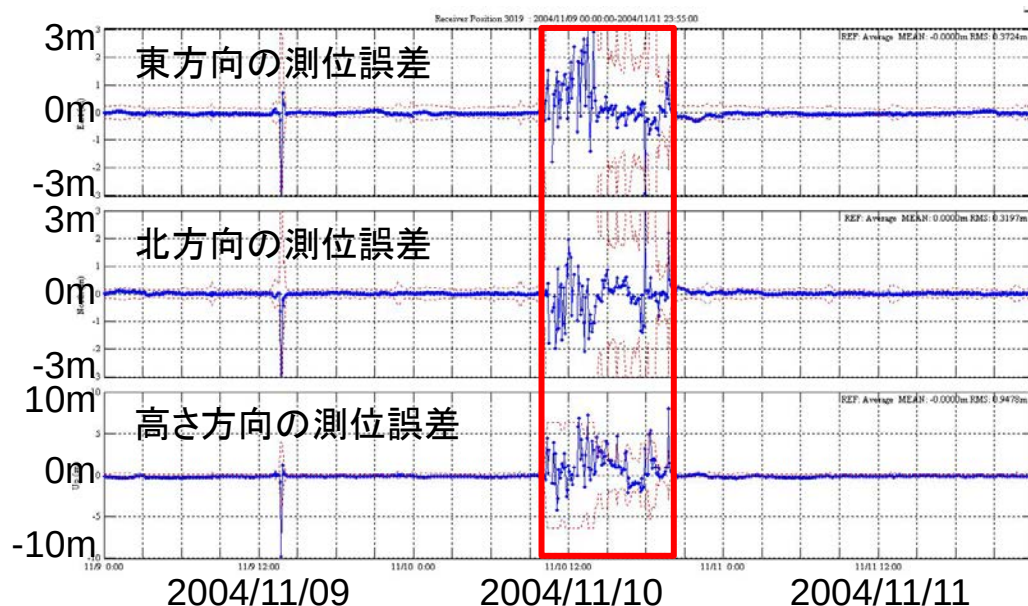


← (左図) 2004年11月10日の夜間に観測された振幅の大きな移動性電離圏擾乱。

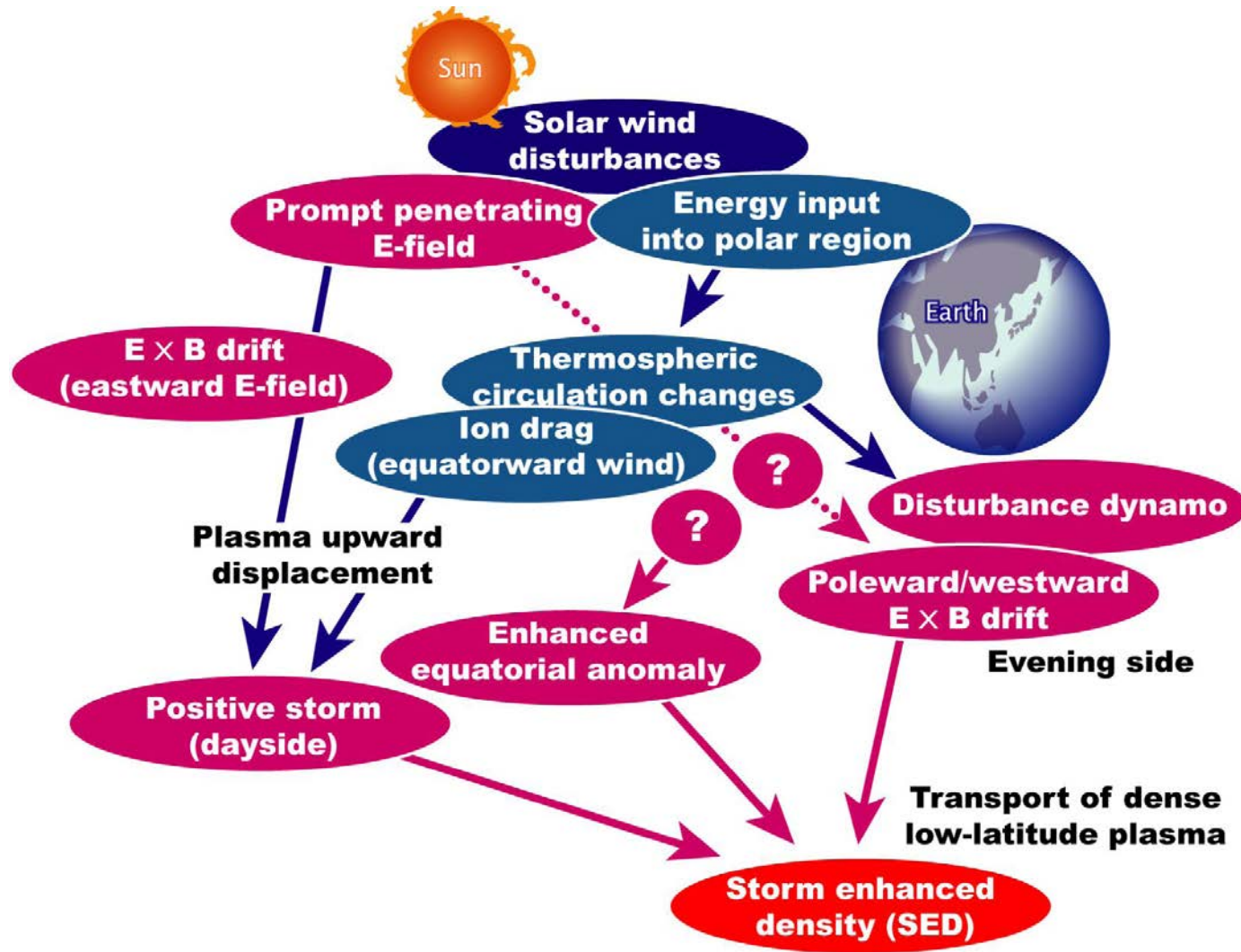
(右図) 振幅の大きな領域で、GPS信号ロック損失率の増大が見られる。
このような観測データは、下記で参照できる。

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

→GPS 2周波を利用した Kinematic GPS測位の誤差 (国分寺、2004年11月9－11日の3日間)。赤枠は、Super-MSTIDが観測されていた時間帯を示す。



Cause and effect of SED

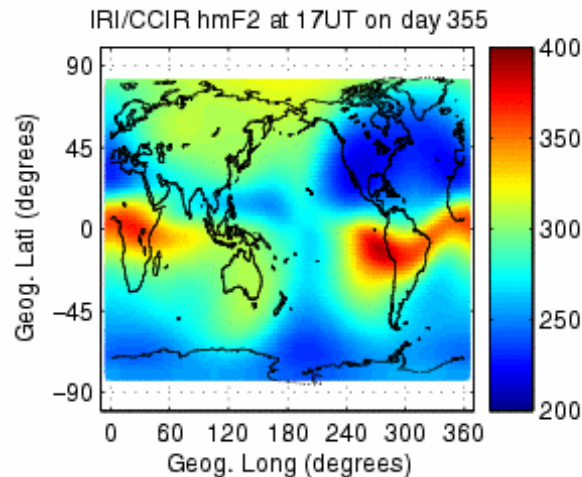
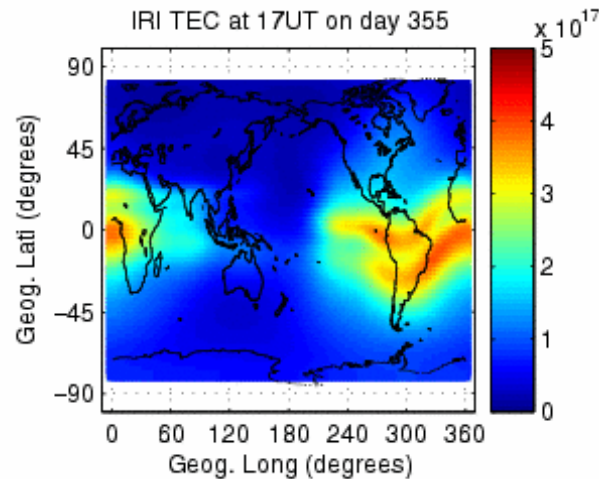
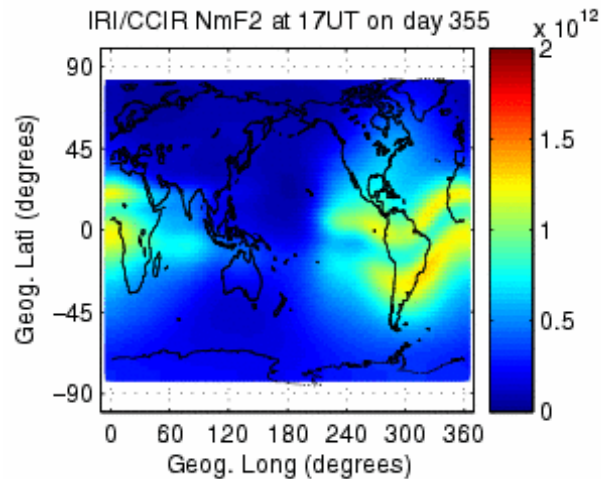


[Maruyama, AOSWA workshop, 2012]

Storm Enhanced Density (SED)

振幅・規模	+ 数10～100TECU (～10m)
時間スケール	数時間 (?)
空間構造	空間勾配が局所的に大きくなる 赤道から南北方向に延びた構造
その他	大規模磁気嵐時、正午～日没にかけて 発生する 数10kmの電離圈イレギュラリティを伴 うこともある。
影響	Differential GPS 誤差 →GPS補強システム (SBAS, GBAS) 電離圈モデル誤差 →単独GPS測位 GPSロック損失 →単独GPS測位

赤道異常



IRI-2001 Model

Generated at
Local Time

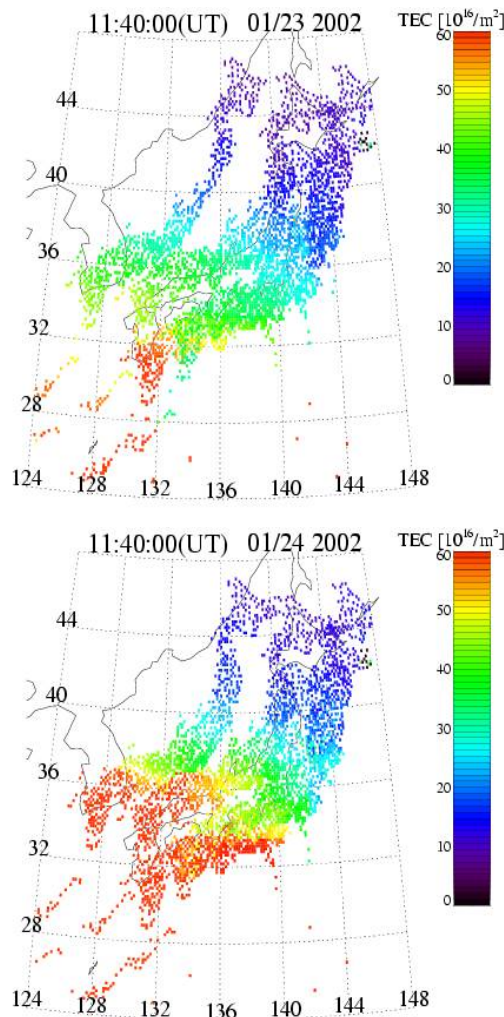
21-Dec-2005 12:00:21

@ Millstone



- 磁気赤道を挟んだ緯度帯（磁気緯度 ± 15 度程度）において電離圏電子密度が高い領域が存在する（太陽天頂角が一番高い赤道で一番電子密度が高いのではない）。
- 存在自体は珍しいものではないが、日々の変動が大きい。
- 磁気嵐があると、極端な発達や消滅、大きな南北非対称性が出ることもある。

赤道異常



- 通常、日本は赤道異常帯クレストの北側の「麓」に位置するため、日々変動の影響が大きい。
- 左図は、磁氣的に静穏な状況での赤道異常の日々変動（2002年1月23日・24日 20:40 JST）
- この時の電離圏によるGPS L1電波の遅延量は緯度30度で19.7m であり、その緯度方向の勾配は 3.2m/degであった。
- この緯度勾配は、IRIモデルから予測される勾配よりも1桁近く大きい。

赤道異常帯の日々変動（2002年1月
23日と24日の同時刻での比較）

赤道異常

振幅・規模	～数10TECU（～数m）
時間スケール	—
空間構造	緯度勾配が大きくなることも多い。
その他	磁気嵐に伴い、異常発達・消滅、南北半球非対称性が発生し得る 基本的には昼間の日照により生成され、夜間は徐々に衰退していく
影響	電離圏モデル誤差 →GPS単独測位

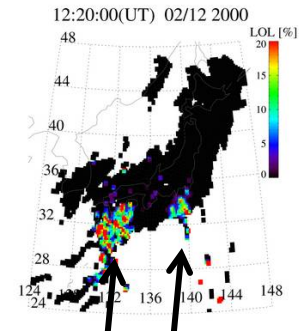
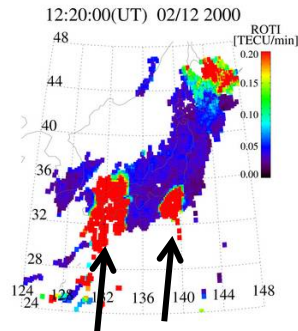
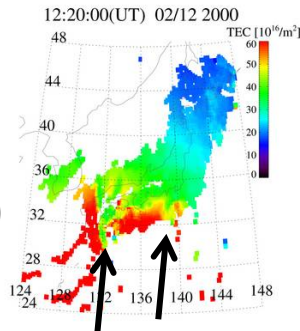
プラズマバブル

TEC絶対値

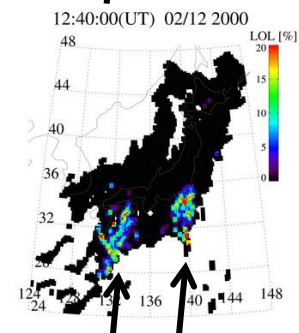
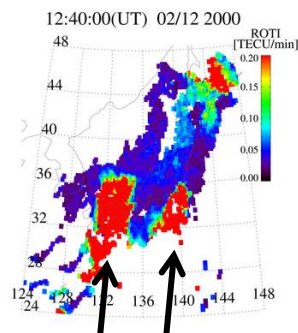
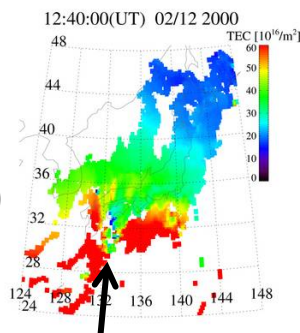
ROTI

ロック損失率

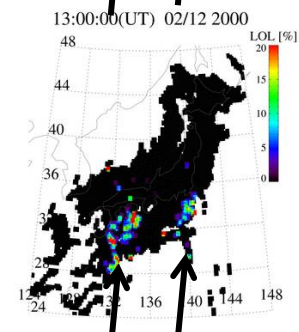
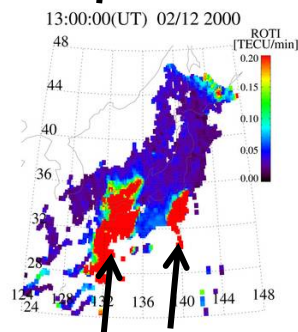
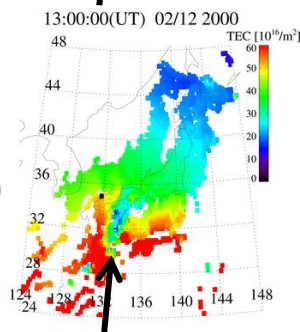
12:20 UT
(21:20 JST)



12:40 UT
(21:40 JST)

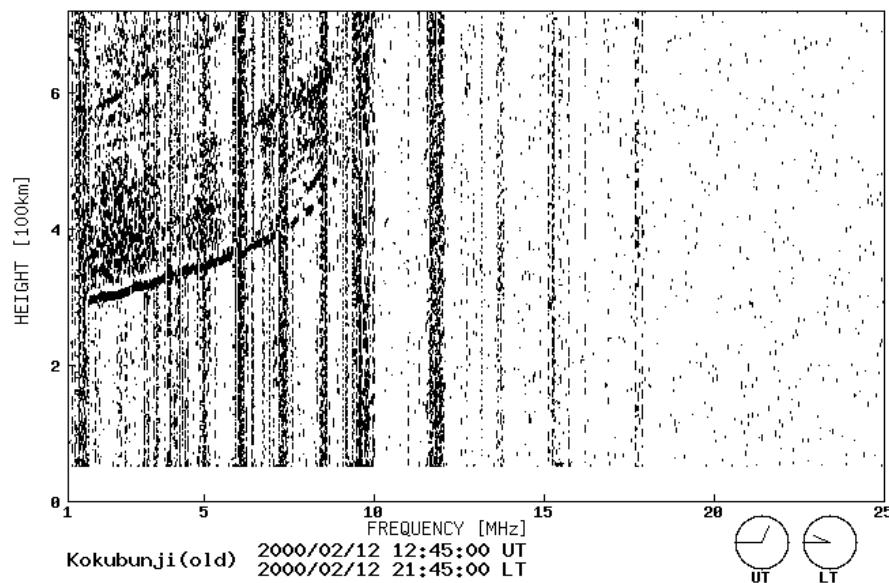
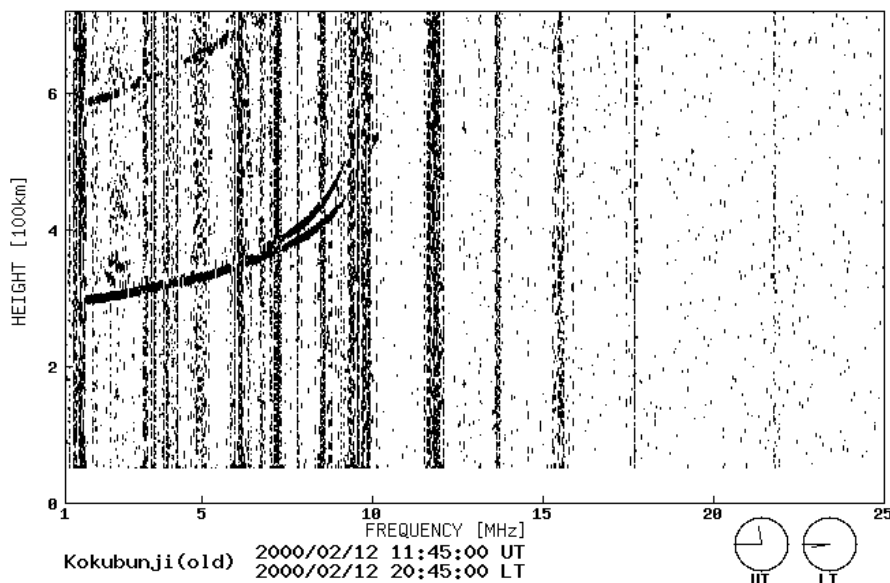


13:00 UT
(22:00 JST)



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

プラズマバブル発生時に観測されたスプレッドF

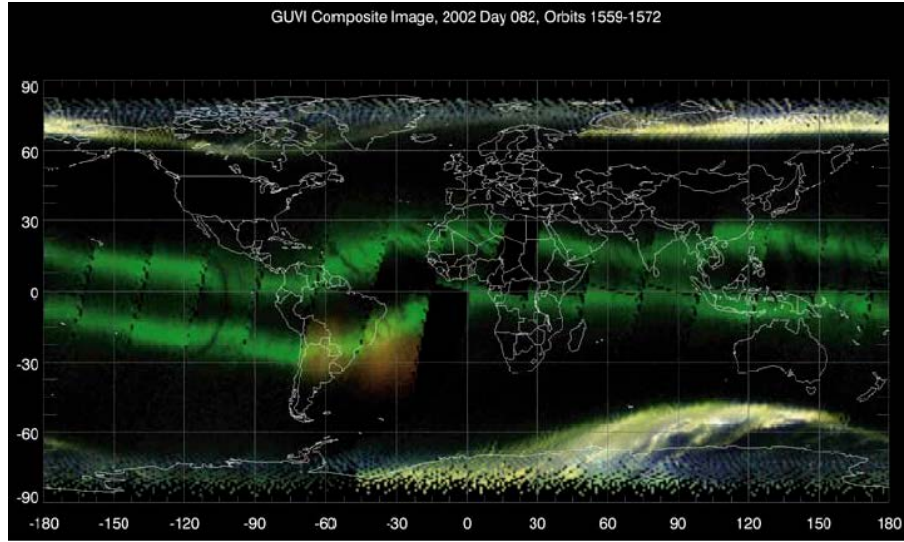


- プラズマバブル通過前の国分寺（左図）では、電離圏エコーがはっきりと観測されている。
- プラズマバブルの国分寺上空通過時（右図）では、エコーが見かけの高さ方向にぼやけている（レンジスプレッドFと呼ぶ）。電離圏の高さが乱れていることを意味する。

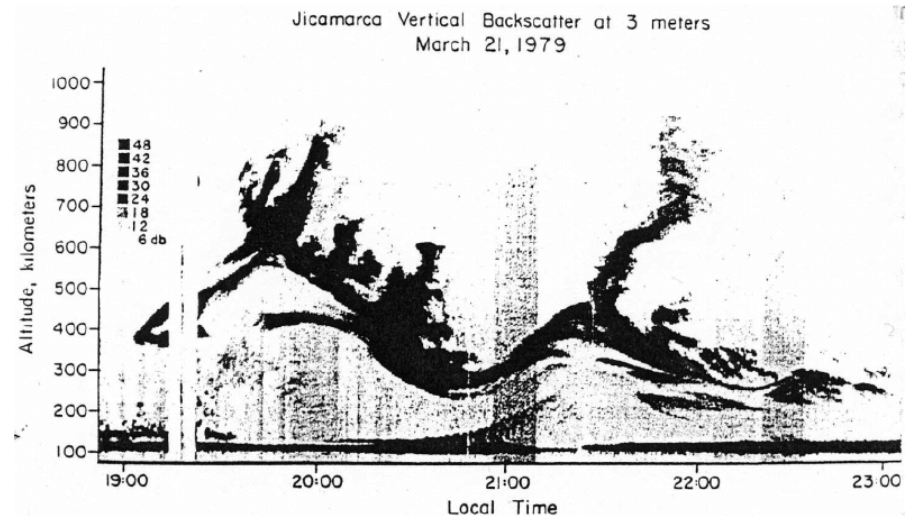
<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>

タブ [データアーカイブ] – [イオノゾンデ定常観測] – [イオノグラム] –
[詳細版 (任意インターバル)]

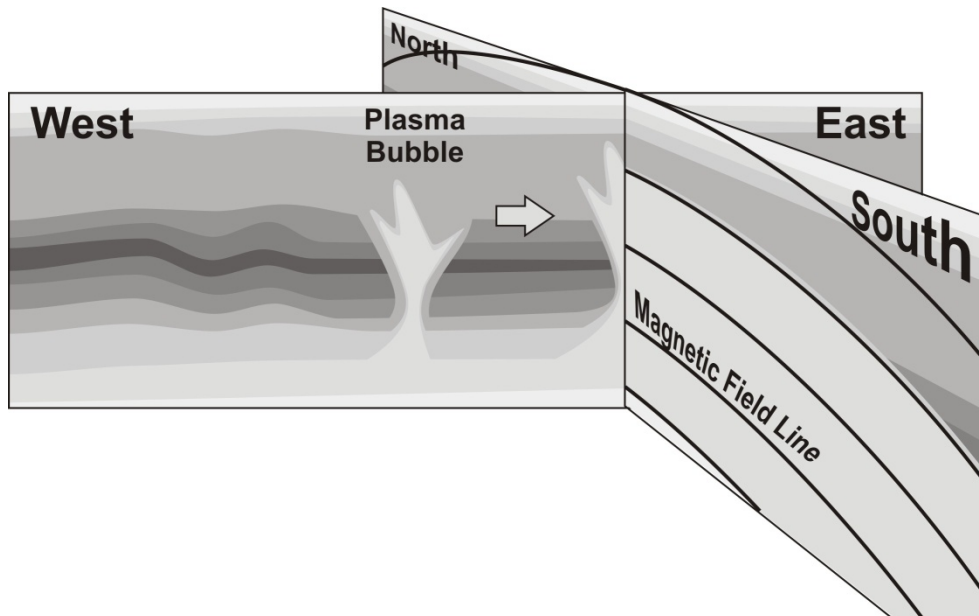
プラズマバブル



低軌道衛星TIMED搭載GUVIによる合成画像135.6nm
[Christensen et al., 2003]



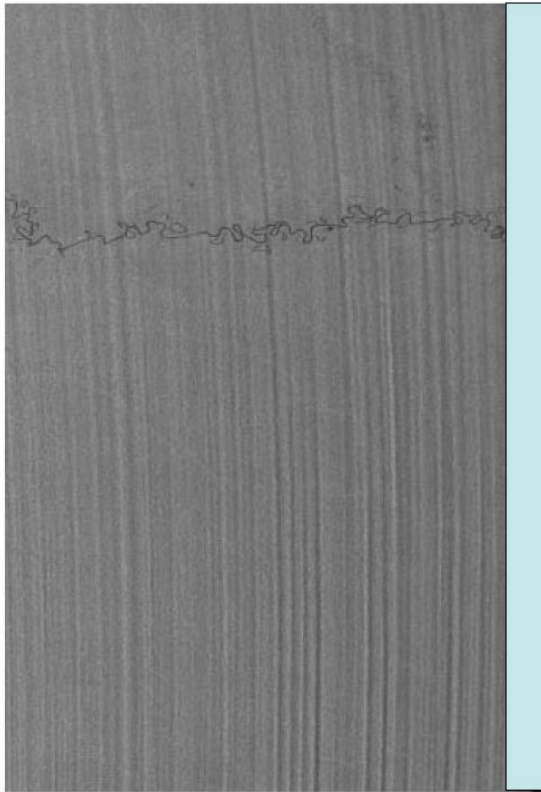
Rayleigh-Taylor 不安定の模式図 [Kelley et al., 1981]



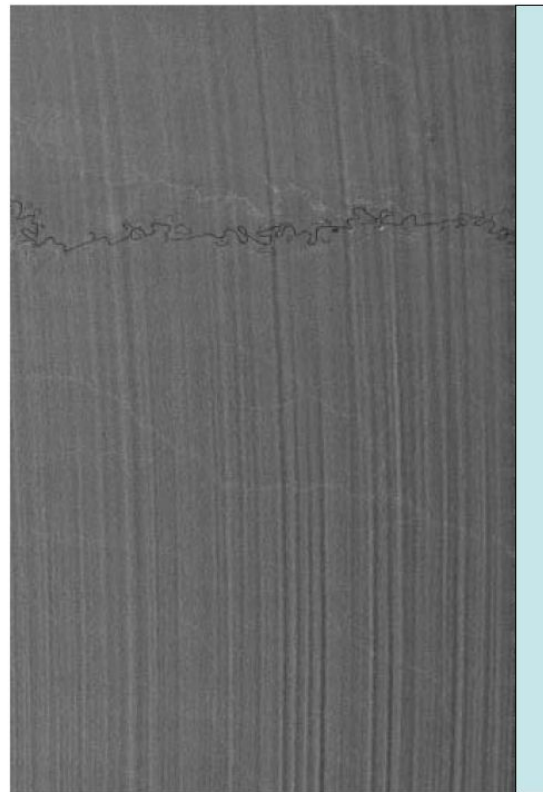
- プラズマバブル：
低緯度電離圏で日没後に、下層のプラズマ低密度領域が急激に上方へ発達する不安定現象。
- 磁力線に沿った構造を持ち、一般的に東進する。
- 磁気嵐に依存せず発生するが、磁気嵐時に強い東向き電場が発生すると、大きく発達する場合がある。

衛星搭載SARデータに見られる電離圏の影響

RSP103_BRS20061126FBD415HVO_W0307149001-03_001



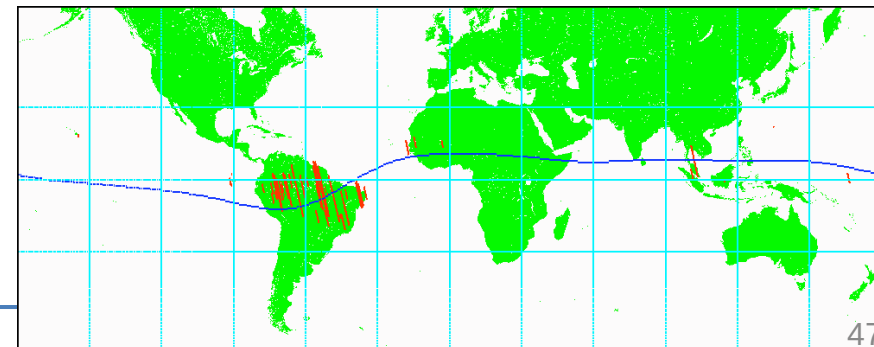
HV



HH

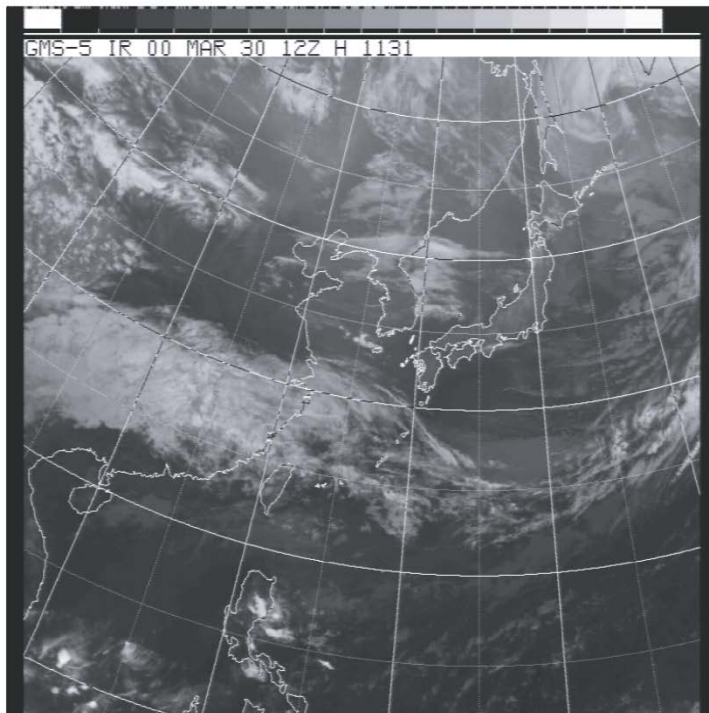
RSP103_BRS20061126FBD415HH0_W0307149001-03_001

ALOS/PALSARデータに縞模様が見えた軌道の分布図[島田他、電離圏シンポジウム、2007]。

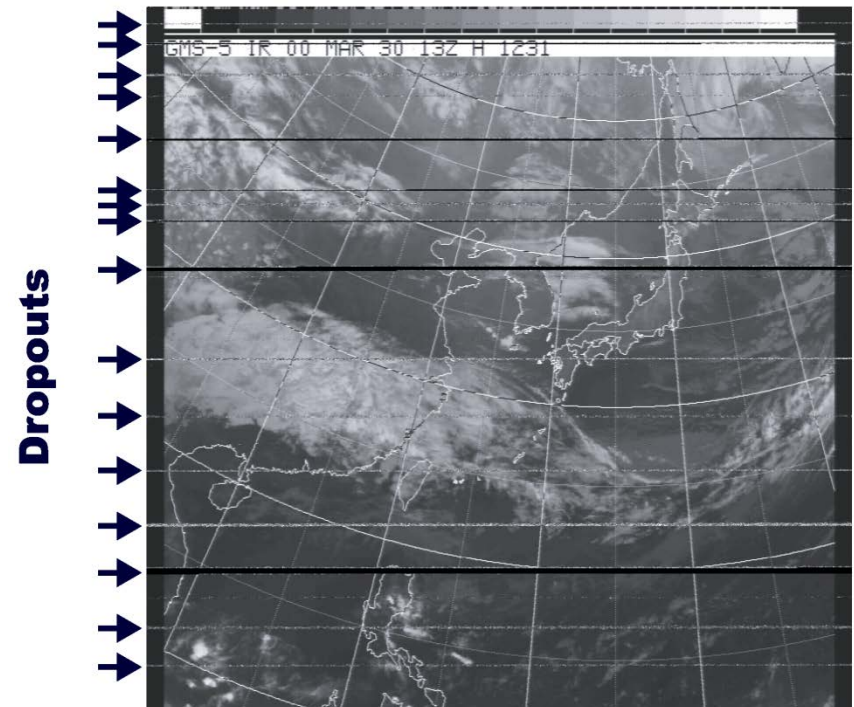


静止気象衛星画像におけるシンチレーションの影響

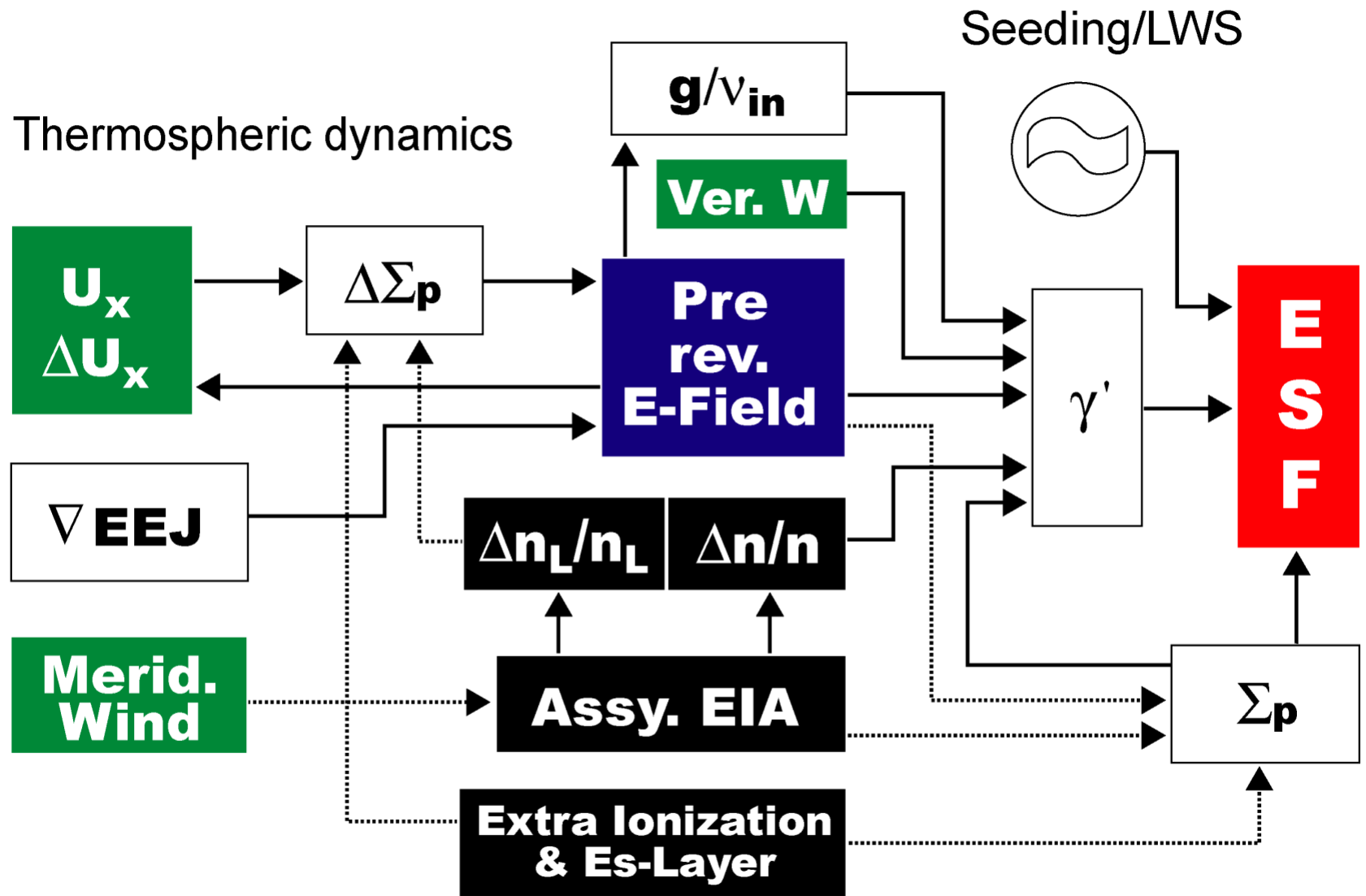
Scintillation Effect on GMS Images
(March 30, 2000)



Scintillation Effect on GMS Images
(March 30, 2000)



Cause and effect of EPB

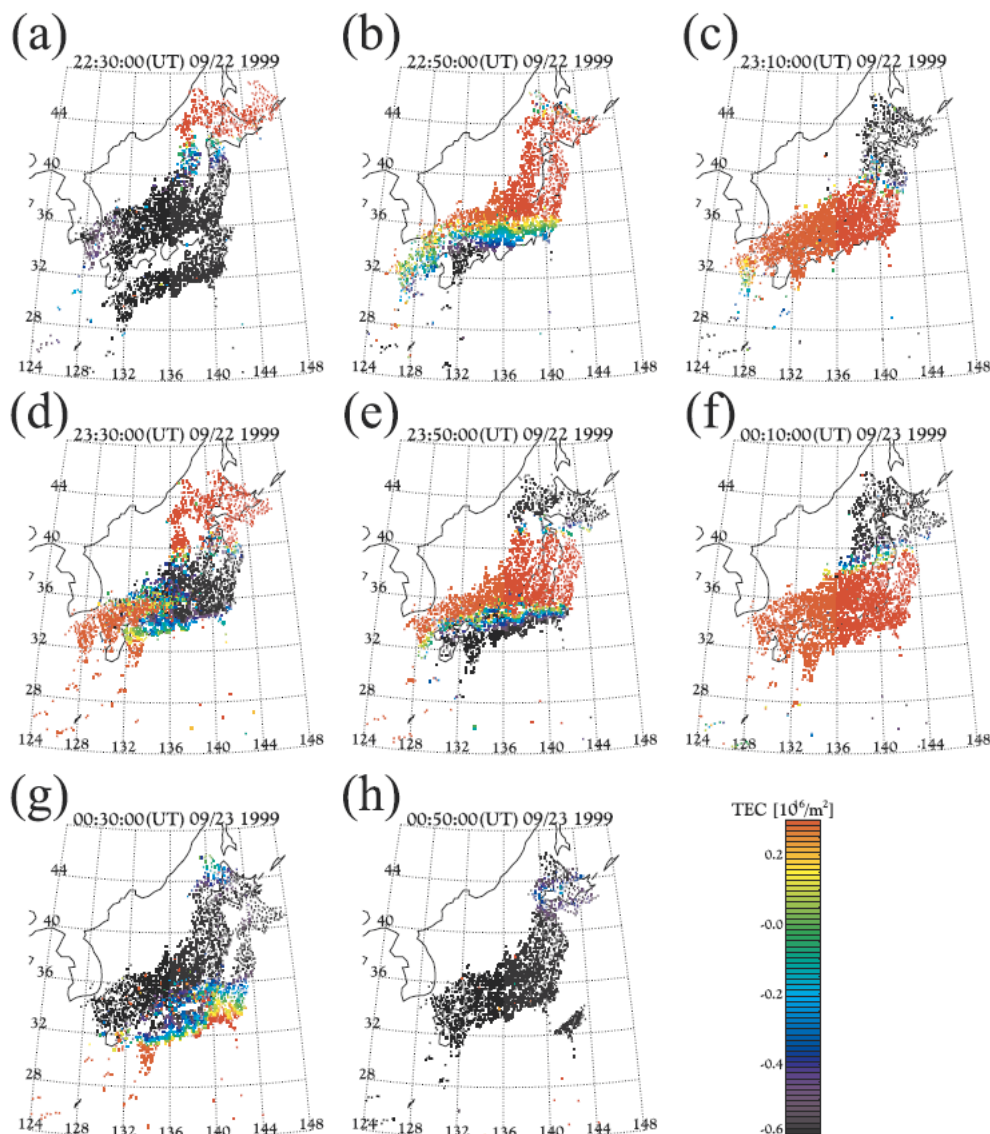


Large scale ionospheric structure [After Abdu (2001)]

プラズマバブル

振幅・規模	－数10～100TECU（～10m）
時間スケール	数10分～数時間
空間構造	空間勾配大きい 磁気赤道を中心に南北方向に延びた構造
その他	磁気赤道から赤道異常帯で、日没後に発生する 磁気嵐にかかわらず発生 数10kmの電離圏イレギュラリティ、GPSシンチレーションを伴う → サイクルスリップ
影響	Differential GPS 誤差 →GPS補強システム（SBAS, GBAS） 電離圏モデル誤差 →単独GPS測位 電離圏シンチレーション →GPSロック損失、衛星通信・SAR

大規模伝搬性電離圏擾乱 (LSTID)



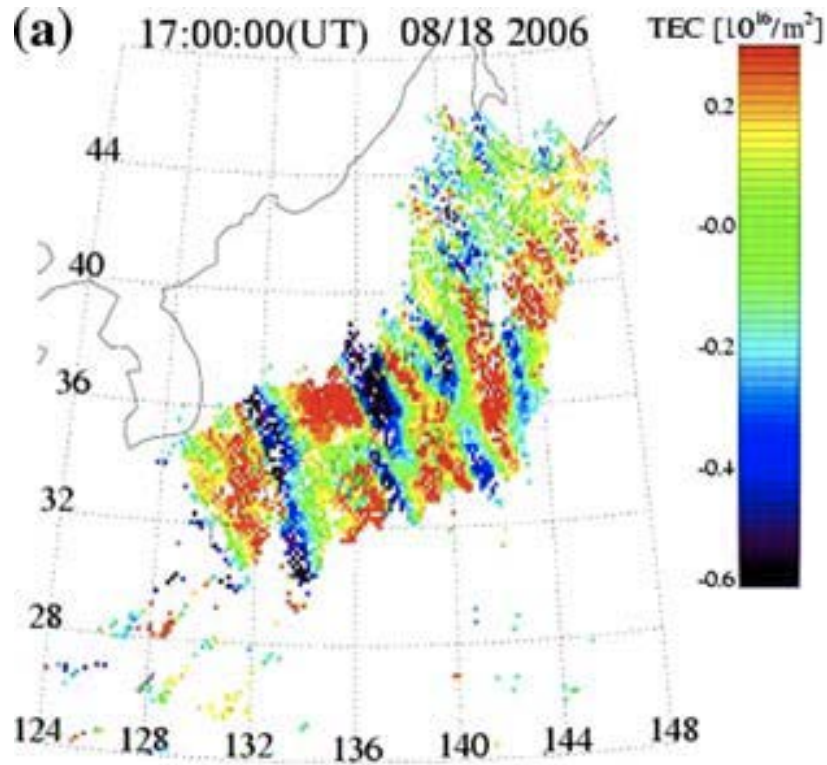
- 磁気嵐時にオーロラ帯で大気が加熱され、大規模な波動となって赤道方向に伝搬する現象。
 - GPS全電子数変動成分（60分以下）の観測が捉えやすい。
- <http://seg-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/MAP/>

[Tsugawa et al., 2003]

大規模伝搬性電離圏擾乱 (LSTID)

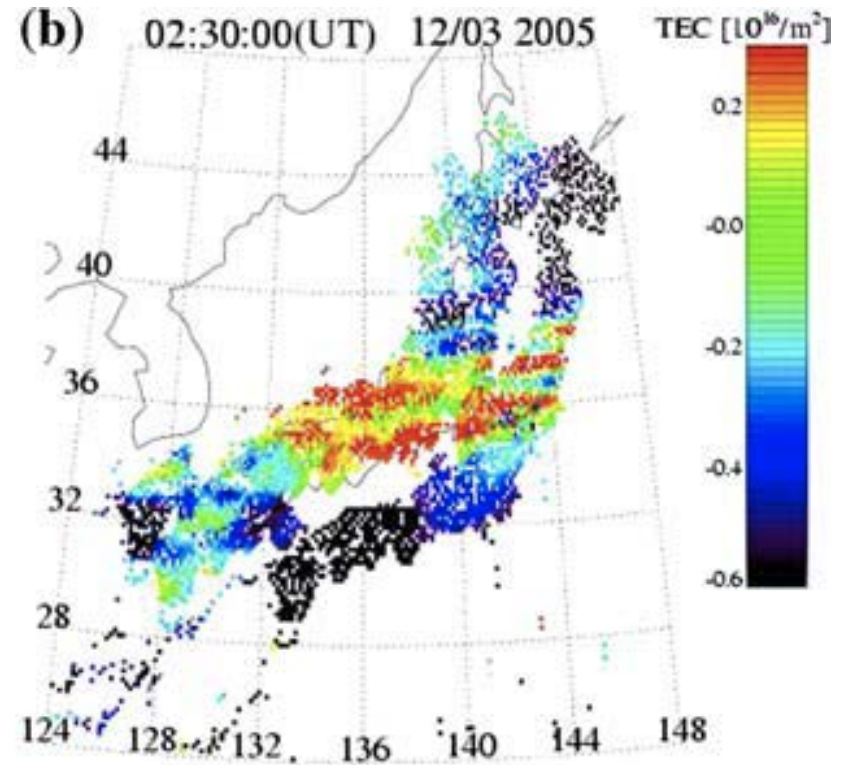
振幅・規模	～±数TECU (< 1m)
時間スケール	周期1～3時間
空間構造	空間勾配はそれほど大きくない 波長1000－3000km、東西方向に延びた波面
その他	磁気嵐時に、オーロラ帯で発生し、低緯度へ伝搬する。
影響	Differential GPS 誤差 →GPS補強システム (SBAS, GBAS) 電離圏モデル誤差 →単独GPS測位

中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID)



夜間MSTID

- 南西方向に伝搬。
- 日本の経度では夏に極大、冬に第二極大。
- 電場変動を伴い、地磁気共役性がある。
→ 電場が成因に重要な役割を果たしている



昼間MSTID

- 南南東方向に伝搬。
- 冬に極大。
- 大気重力波の wind filtering 効果と矛盾しない → 大気重力波が原因

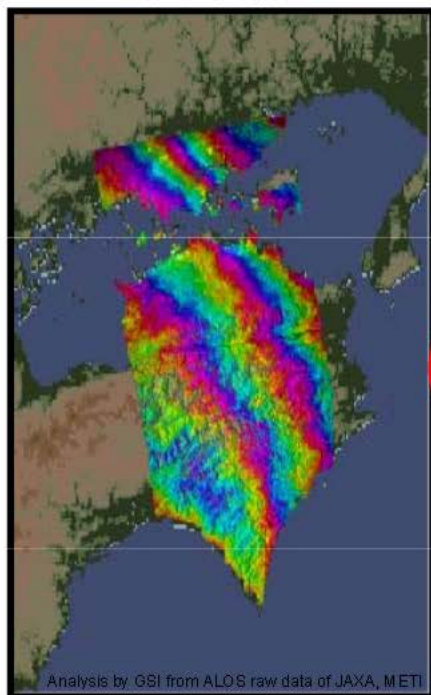
[Tsugawa et al., GPS solut., 2007]

- GPS全電子数変動成分（60分以下）の観測が捉えやすい。
<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/MAP/>

衛星搭載SARデータに見られるMSTIDの影響

干渉SARにおける誤差と電離層の状態

2008/07/18－2009/7/21
のSAR干渉画像

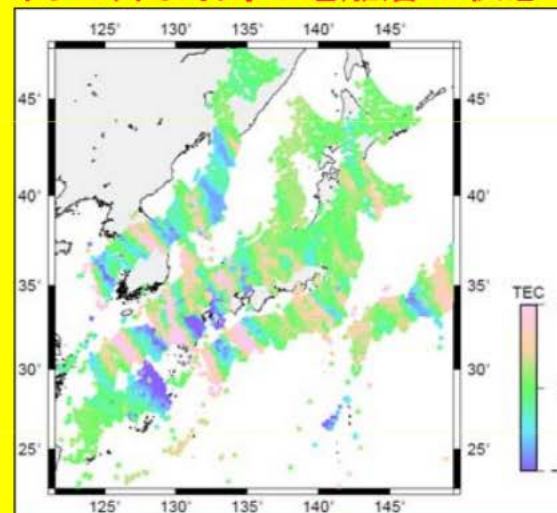


パターン
が一致

先行研究「GPS統合解析技術の高度化」(H21-H23)
電子基準点データを用いた、GPS解析(1周波観測^注)に適用可能な
電離層補正

成果の利用

同日、同時刻の電離層の状態



「中規模伝搬性電離層擾乱(MSTID)」が発生していた
数100km程度の空間スケール。北西－南東の波面をもち、
南西に伝播。

[<http://www.gsi.go.jp/common/000075391.pdf>]

中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID)

振幅・規模	～±数TECU（＜ 1m）
時間スケール	周期数10分。
空間構造	空間勾配は小さい。 波長数100km程度。 夜間：北西-南東に延びた波面 昼間：概ね東西方向に延びた波面
その他	夜間と昼間のMSTIDは生成機構が異なると考えられている
影響	衛星搭載SAR誤差 Differential GPS 誤差

スプラディックE層 (Es層)



- 高度100 k m付近に夏季の日中～夕方に発生する電子密度の高い領域

スプラディックE層 (Es層)



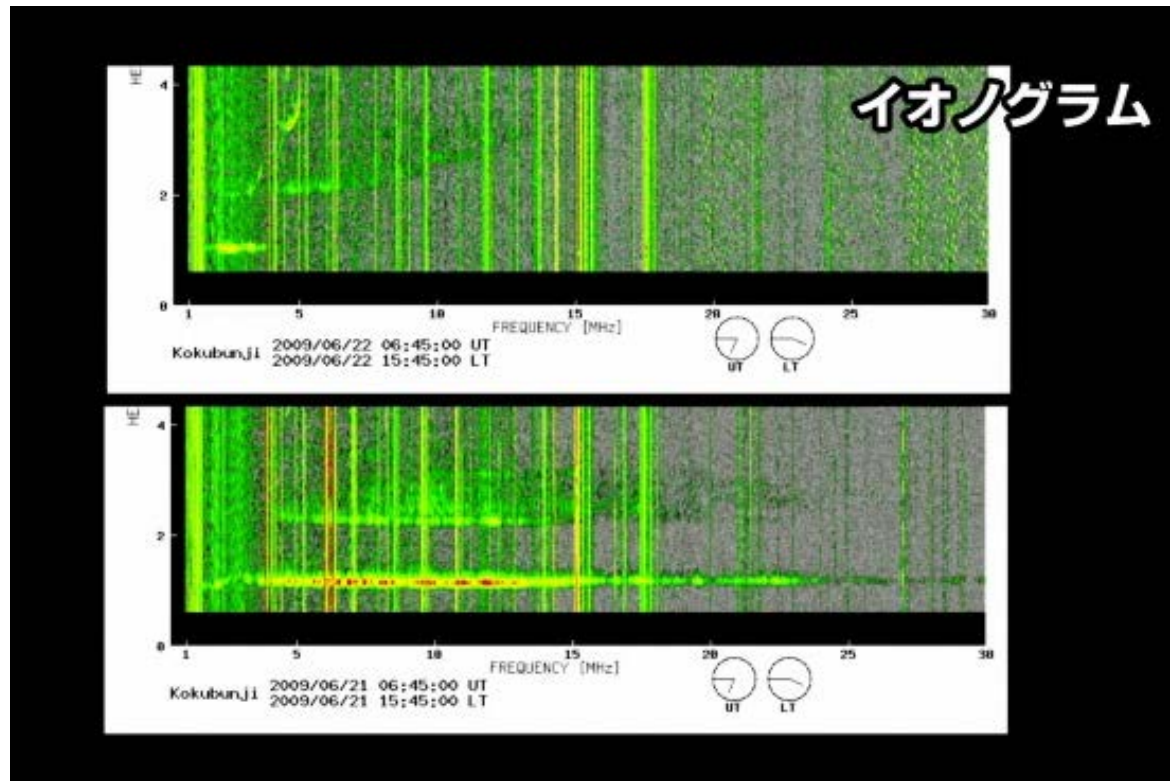
- 高度100 km付近に夏季の日中～夕方に発生する電子密度の高い領域

スποラディックE層 (Es層)



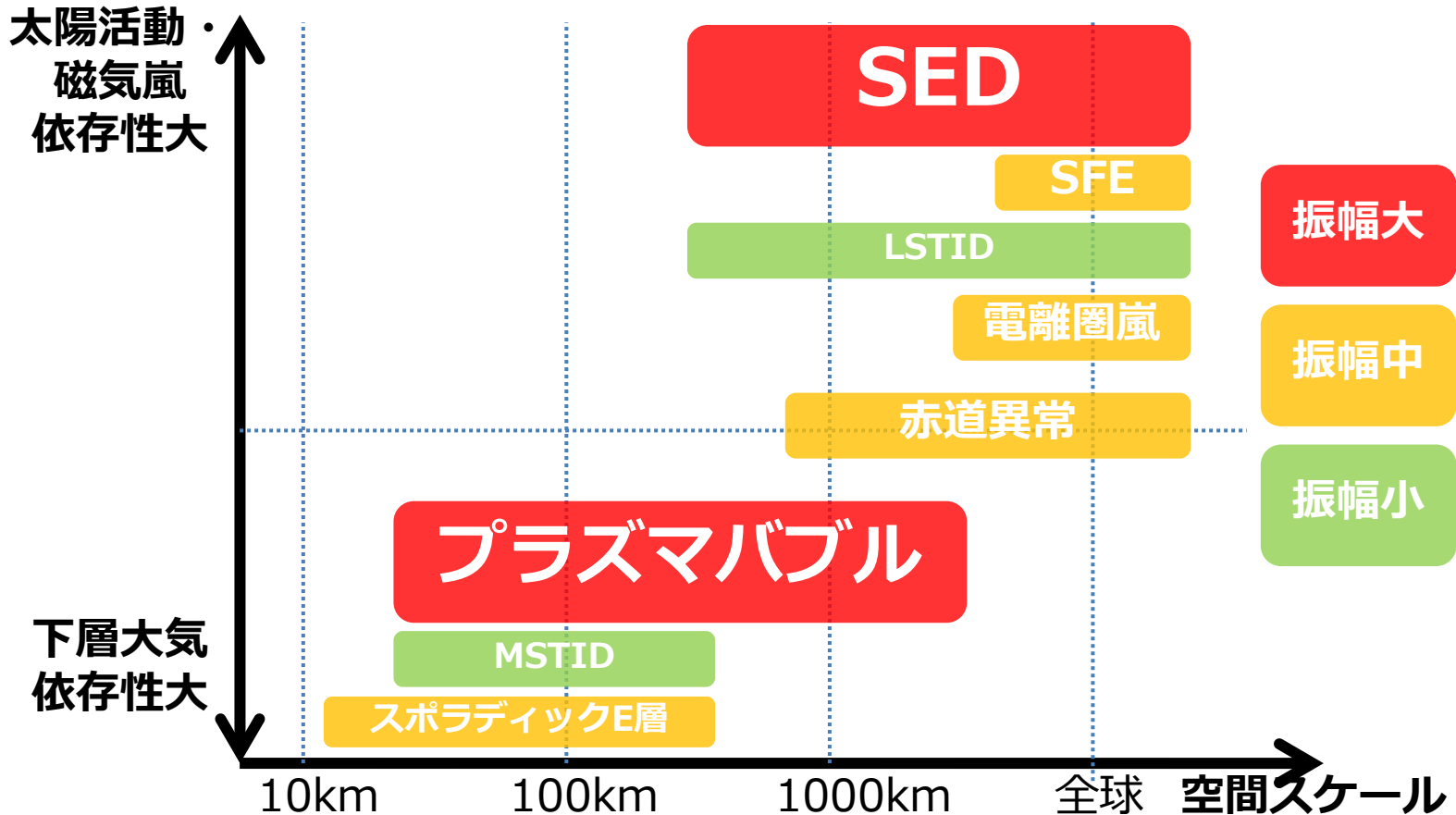
- 高度100 k m付近に夏季の日中～夕方に発生する電子密度の高い領域
 - E領域付近の風が高さによって差がある状態（シア）が、Es層の発生に重要と考えられているが、まだ詳細な発生メカニズムはわかっていない。
- 58 • スポラディックE層が発生すると、遠方（例えば中国など近隣諸国）のVHFテレビ放送波が混信するなどしていた

イオノグラムで見るスプラディックE層 (Es層)



- 高度100km付近に水平に伸びる反射帯
- 高度方向に整数倍に位置するものは「マルチエコー」や「サテライトトレース」と呼ばれ、地面と電離圏で複数回反射した結果として現れるもので、実体ではない。
- <http://wdc.nict.go.jp/IONO/>
タブ [データアーカイブ] – [イオノゾンデ定常観測] – [イオノグラム] – [詳細版 (任意インターバル)]

電離圏擾乱現象と電波伝播への影響まとめ



- 衛星測位等に影響が大きいのは電子密度の空間勾配が大きいプラズマバブルとSED。
- 中低緯度に位置する日本付近では、SEDよりもプラズマバブルの出現の方が頻度大。
- プラズマバブルは不規則構造を内包するため、電離圏シンチレーションにより、GPSロック損失、通信障害等を起こす。
- 振幅は小さいが、MSTID（中規模伝播性電離圏擾乱）は衛星搭載SARやDGPSにも影響を与える。
- 高緯度のオーロラ粒子振込によってもGPSシンチレーションやロック損失は起こる。