



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Ionospheric Radio Propagation
Author(s)	前田, 隼; Maeda, Jun
Description	「PSTEPサマースクール陸別2017、2017年7月30日-8月4日、陸別町タウンホール」 主催：文部科学省科学研究費補助金新学術領域「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成」（領域代表：草野完也） 共催：名古屋大学宇宙地球環境研究所 協力：陸別町
Issue Date	2017-08-03
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/67581">https://hdl.handle.net/2115/67581</a>
Type	lecture
File Information	20170804_PSTEP_A01_JM_final31-1.pdf



# Ionospheric Radio Propagation

**Jun Maeda**  
Hokkaido University





## IT IN EMERGENCIES

FITTEST

Training

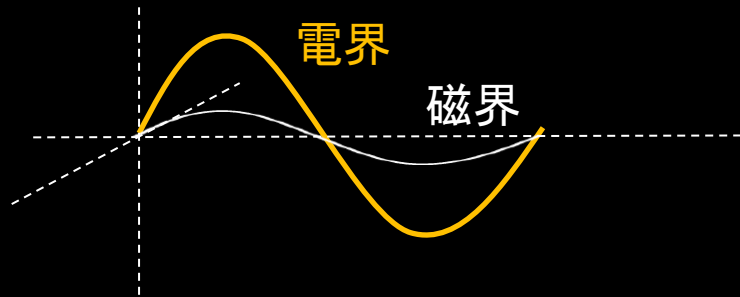
The Fast Information Technology and Telecommunications Emergency and Support Team (FITTEST) is the IT emergency response capacity of World Food Programme (WFP). Its members are renowned for their passion for

## RELATED PUBLICATIONS

- ・国連による無線通信確保：食糧供給とともに第一線へ
- ・非常通信網としての役割
  - ・東日本大震災 2011.3.11
  - ・クライストチャーチ地震 2011.2.22
  - ・ハイチ地震 2010.1.12

# 電波・通信の歴史

電磁波：光子であり(横)波



## 電離層の歴史

- 1864 マクスウェル 電磁波の存在を予測
- 1888 ヘルツ 電磁波の存在を確認
- 1902 ケネリー・ヘヴィサイド電離層を予測
- 1924 アップルトンにより電離層を確認

## 実用が先行

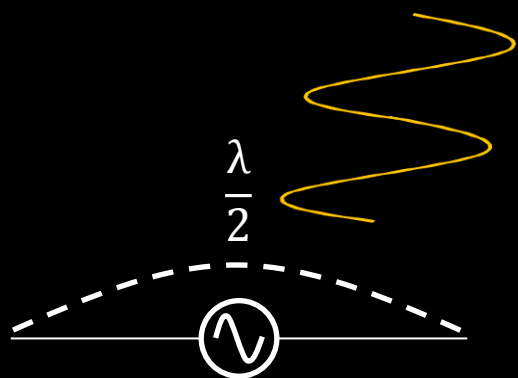
研究 ←→ 実利用

## 実用上の歴史

- 1840 有線電信
- 1876 有線電話
- 1895 マルコーニによるアンテナの開発
- 1899 マルコーニ イギリス-フランス無線電信
- 1901 マルコーニ 大西洋横断通信
- 1906 アメリカで初の無線電信
- 1920 アメリカでラジオ放送
- 1925 日本でラジオ放送
- 1930 アメリカで電信網が発達
- 1941 アメリカで白黒テレビが登場
- 1952 日本で白黒テレビが登場
- 1954 アメリカでカラーテレビが登場
- 1960 日本でカラーテレビが登場
- 1958 トランジスター
- 1959 IC
- 1979 携帯電話
- 1988 インターネット
- 2003 日本で地上波デジタル放送
- Now Wi-Fi, Suica, ETC, RFID, GNSS, IH調理器,  
電子レンジ、電波時計

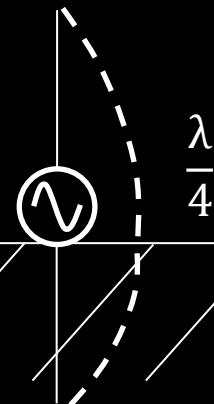
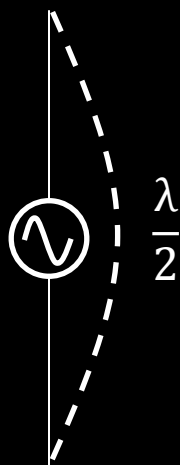
# アンテナ(空中線)

水平偏波(HF)



ダイポール・アンテナ

垂直偏波  
(LF/MF/VHF/UHF)

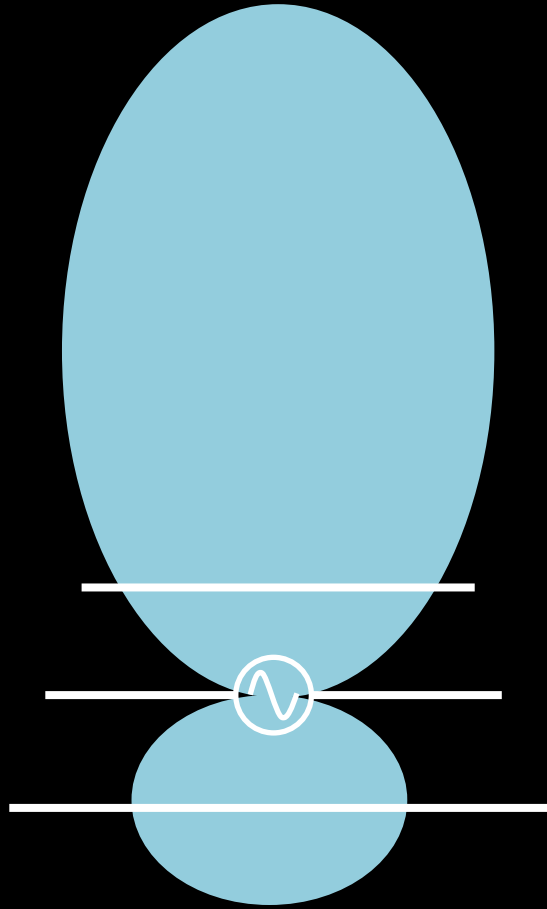


LF/MF → 建設の都合  
VHF/UHF → 移動体通信

バーチカル・アンテナ

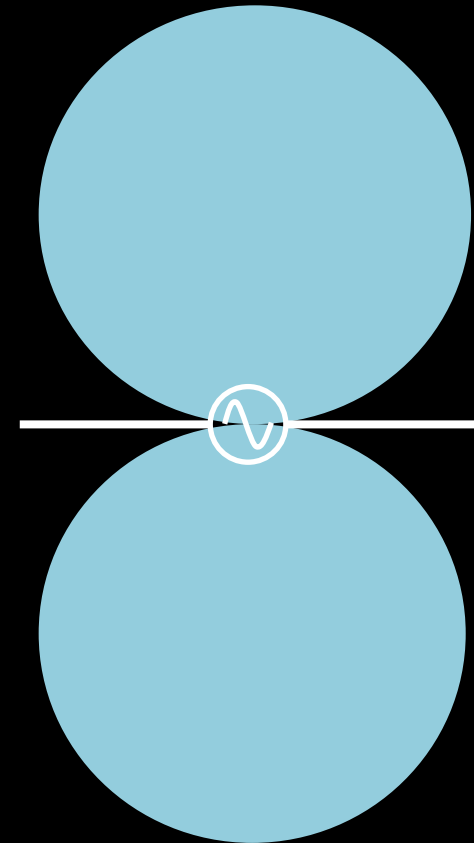
# 指向性アンテナ

(上から見た図)

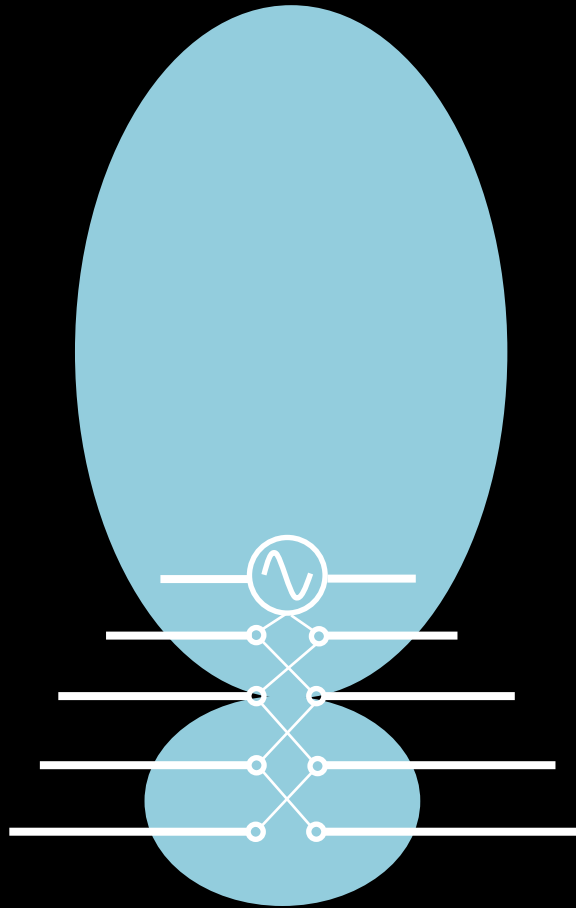


八木・宇田アンテナ

# ダイポール・アンテナ



# 指向性アンテナ



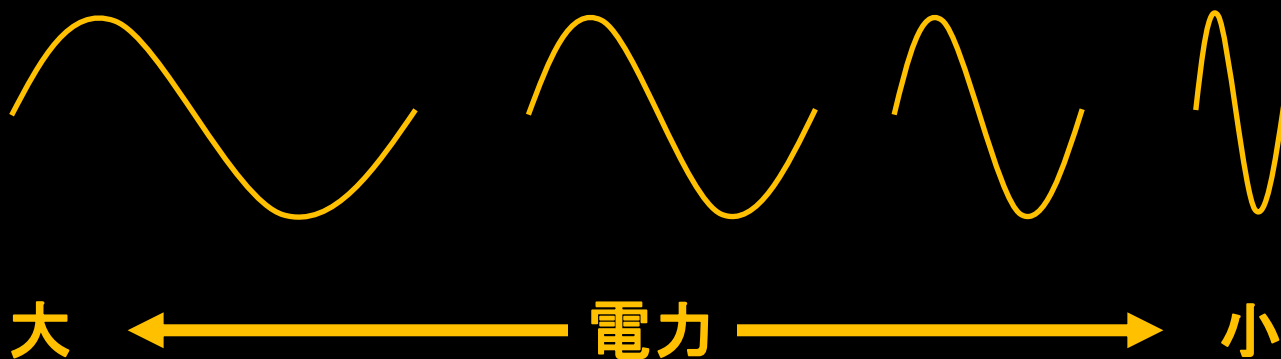
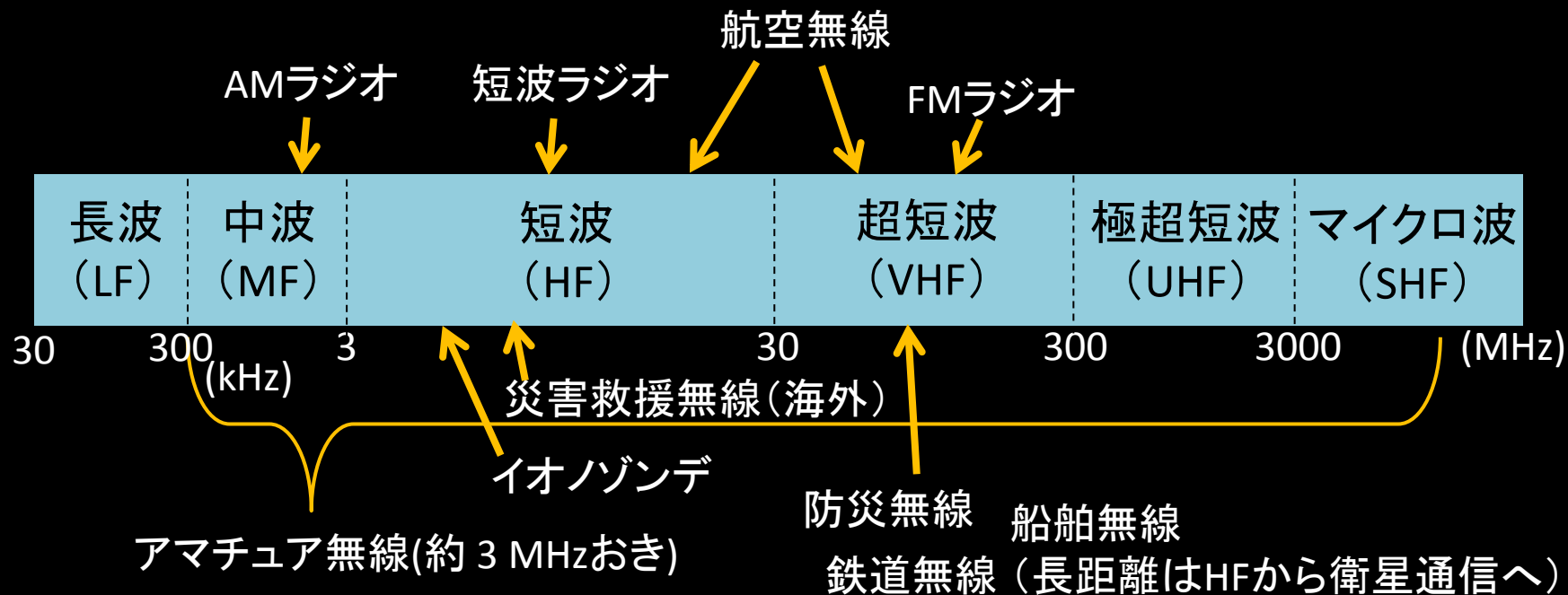
ログペリオディックアンテナ  
(広帯域指向性アンテナ)

実物は明日の見学で！

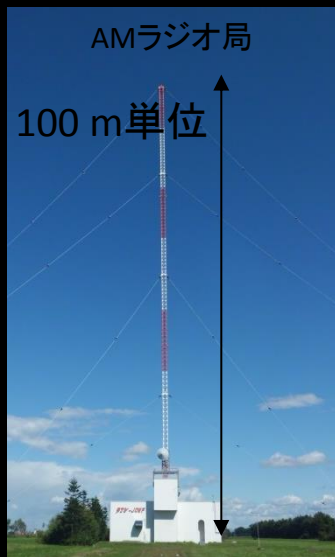
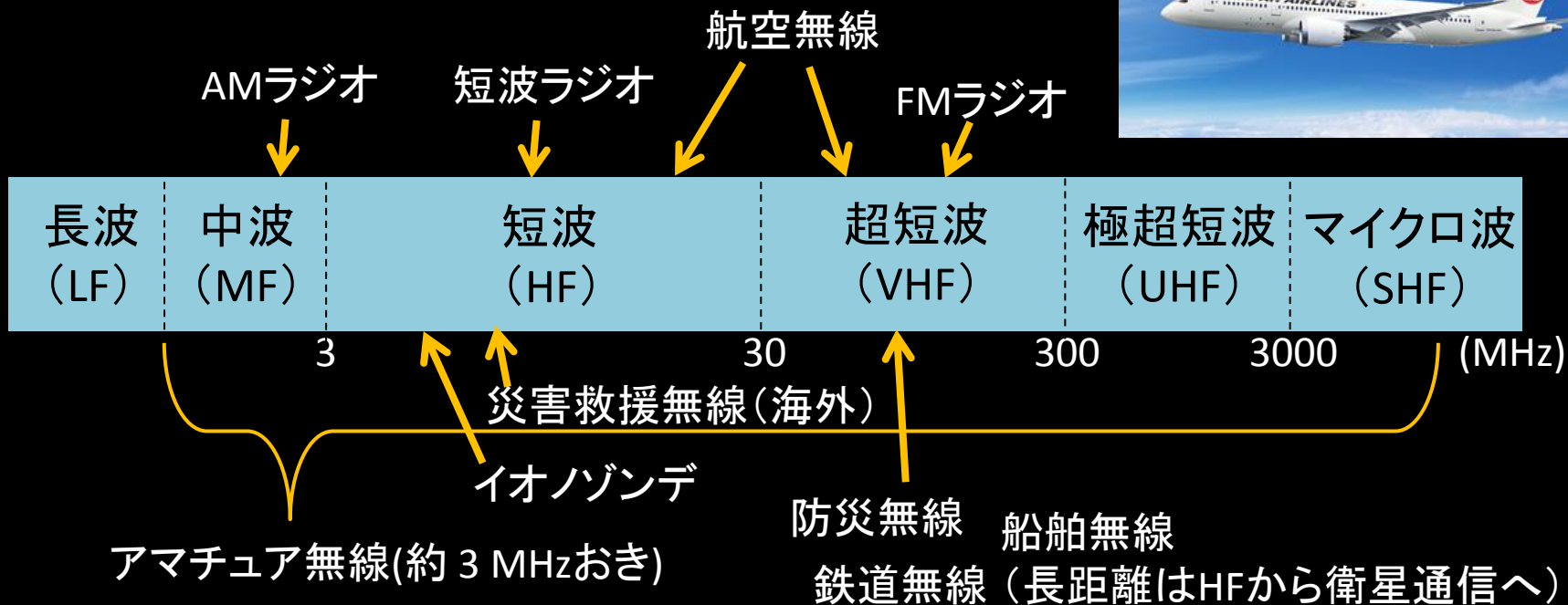


SuperDARN陸別レーダー  
(9~16 MHz, 10 kW out)

# 誰がどの周波数を使っているか



# アンテナと電力、それが問題だ



それ以上に電離圏が問題だ



Courtesy of NASA images.

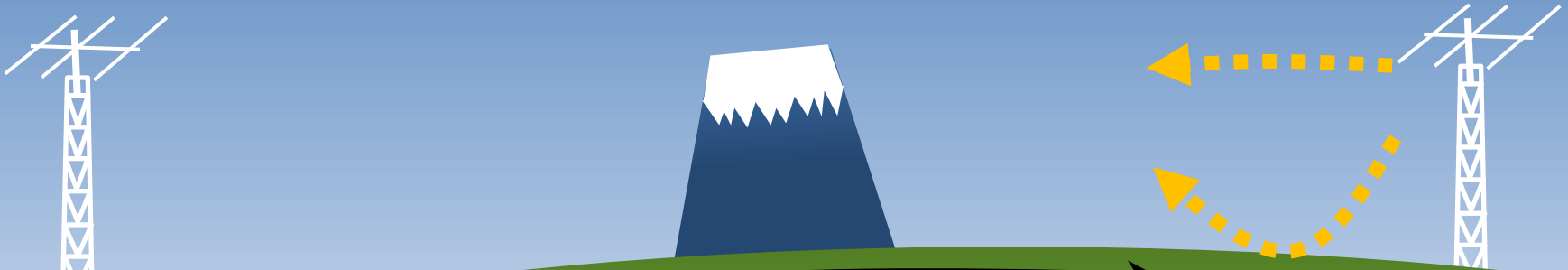
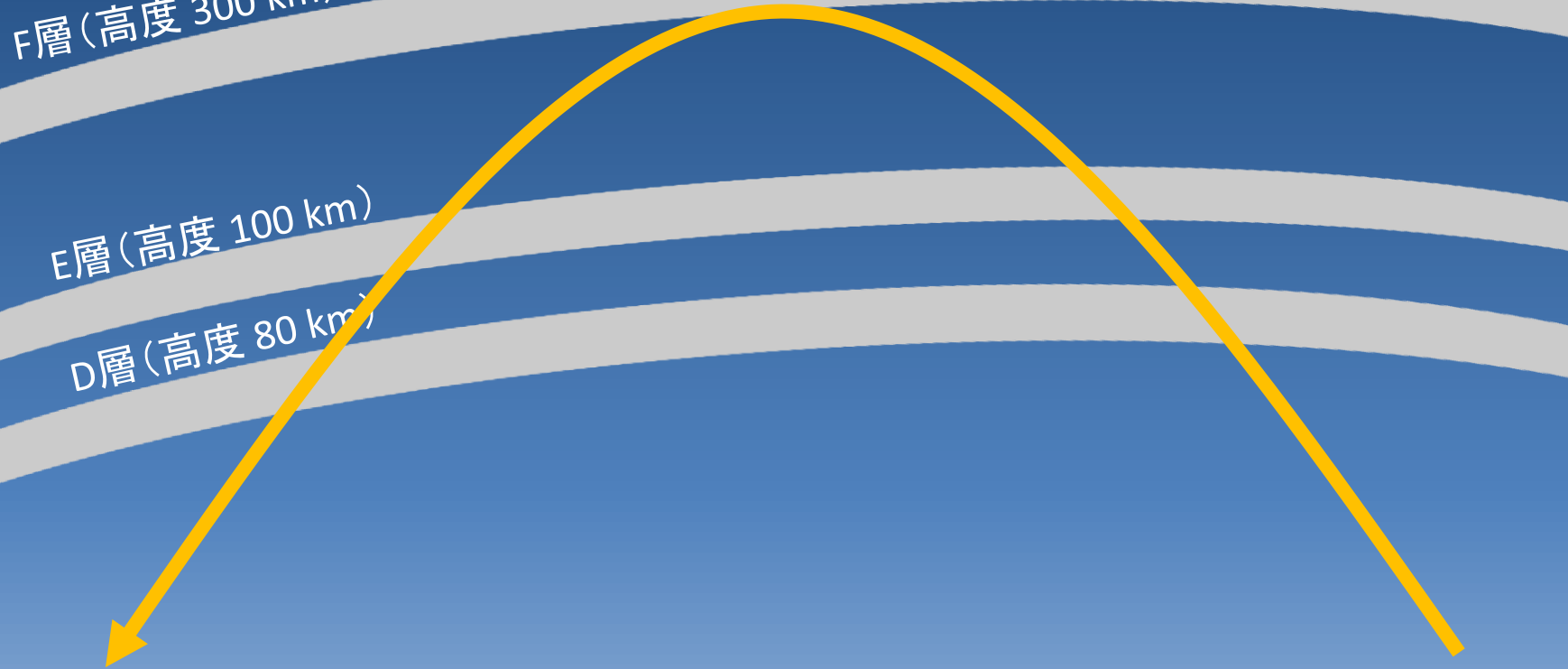
# 短波の電波伝搬



F層 (高度 300 km)

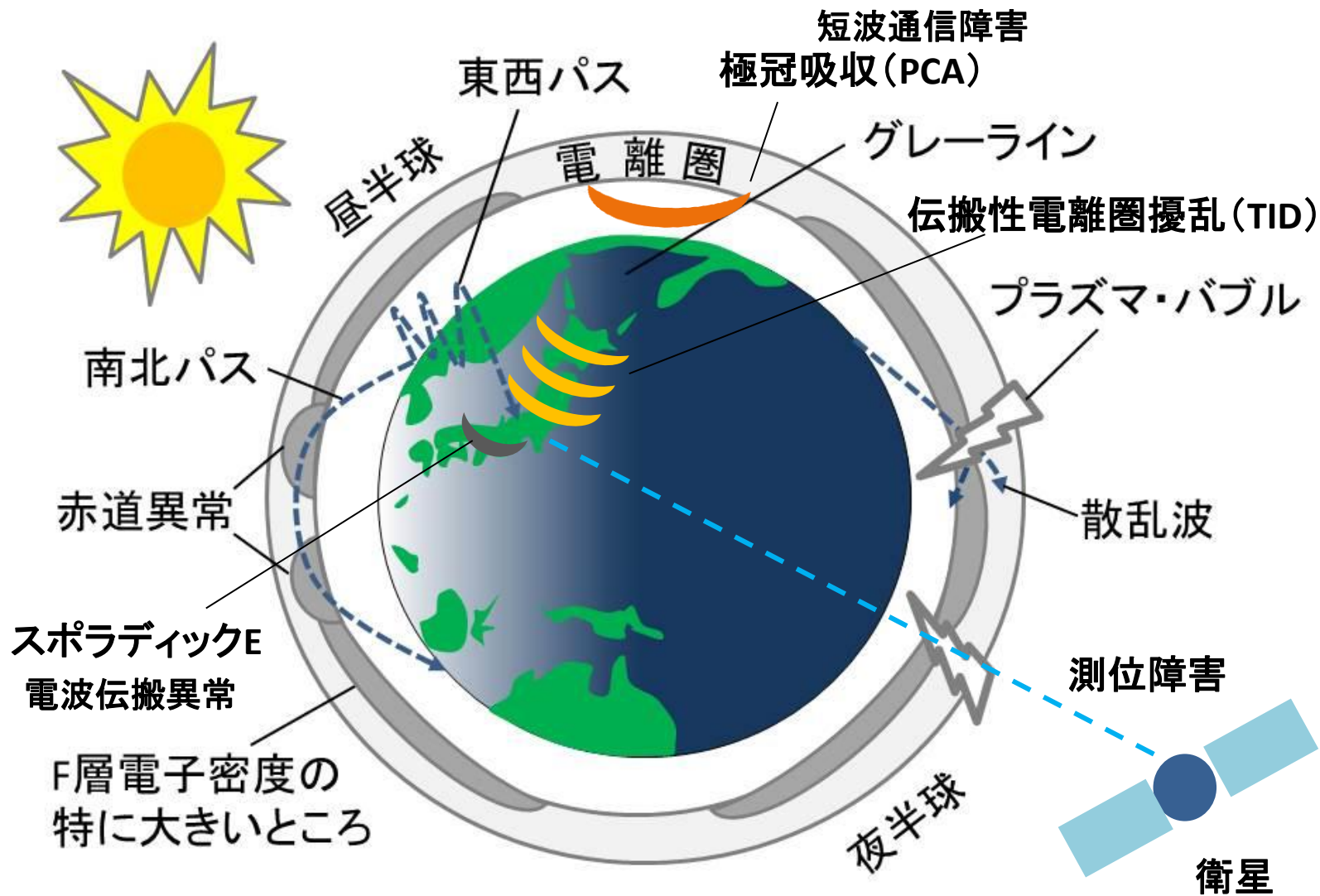
E層 (高度 100 km)

D層 (高度 80 km)



スキップ・ゾーン





# 中波の電波伝搬(昼間)



F層(高度 300 km)

E層(高度 100 km)

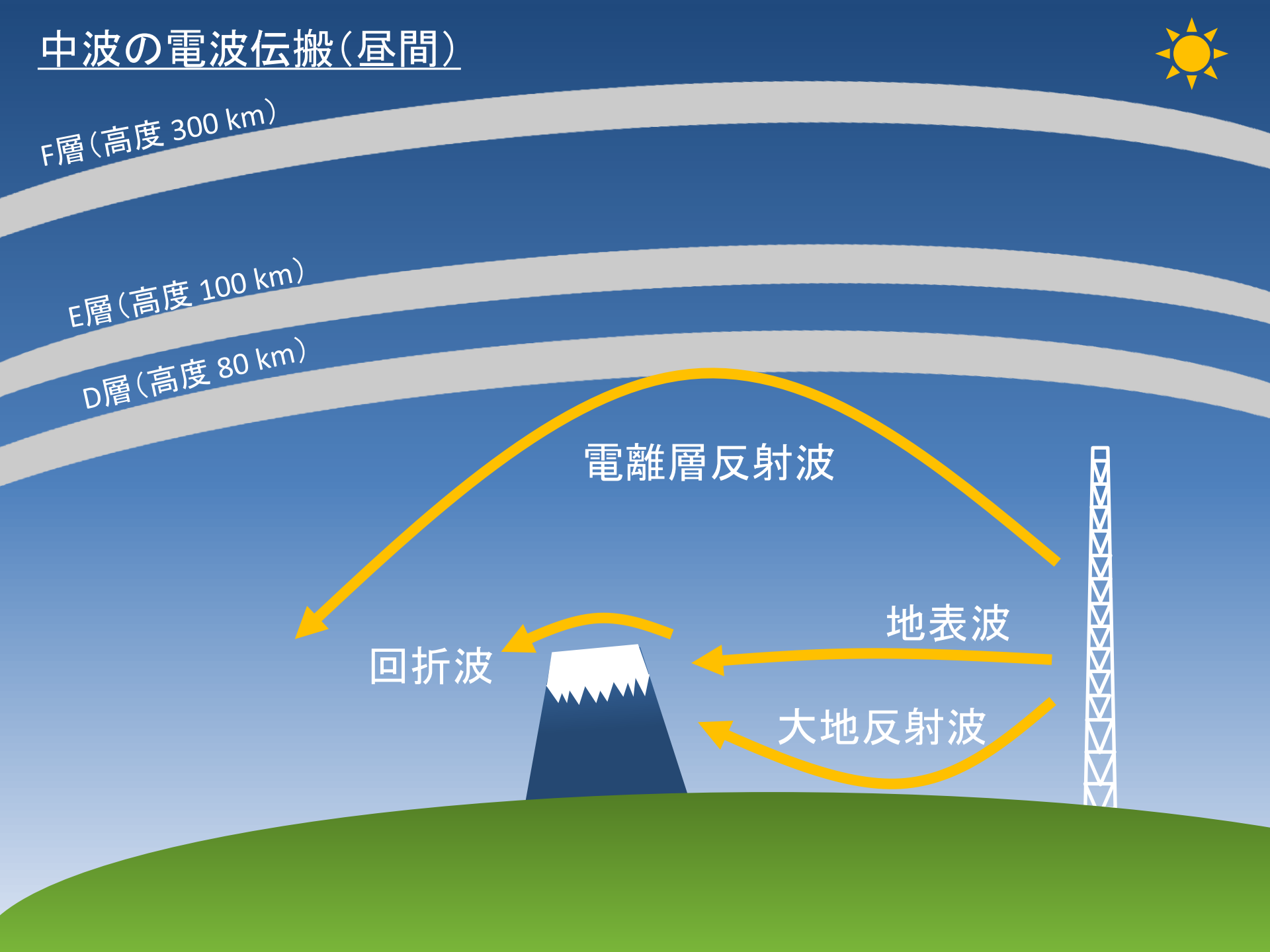
D層(高度 80 km)

電離層反射波

地表波

回折波

大地反射波



# 中波の電波伝搬(夜間)

F層(高度 300 km)

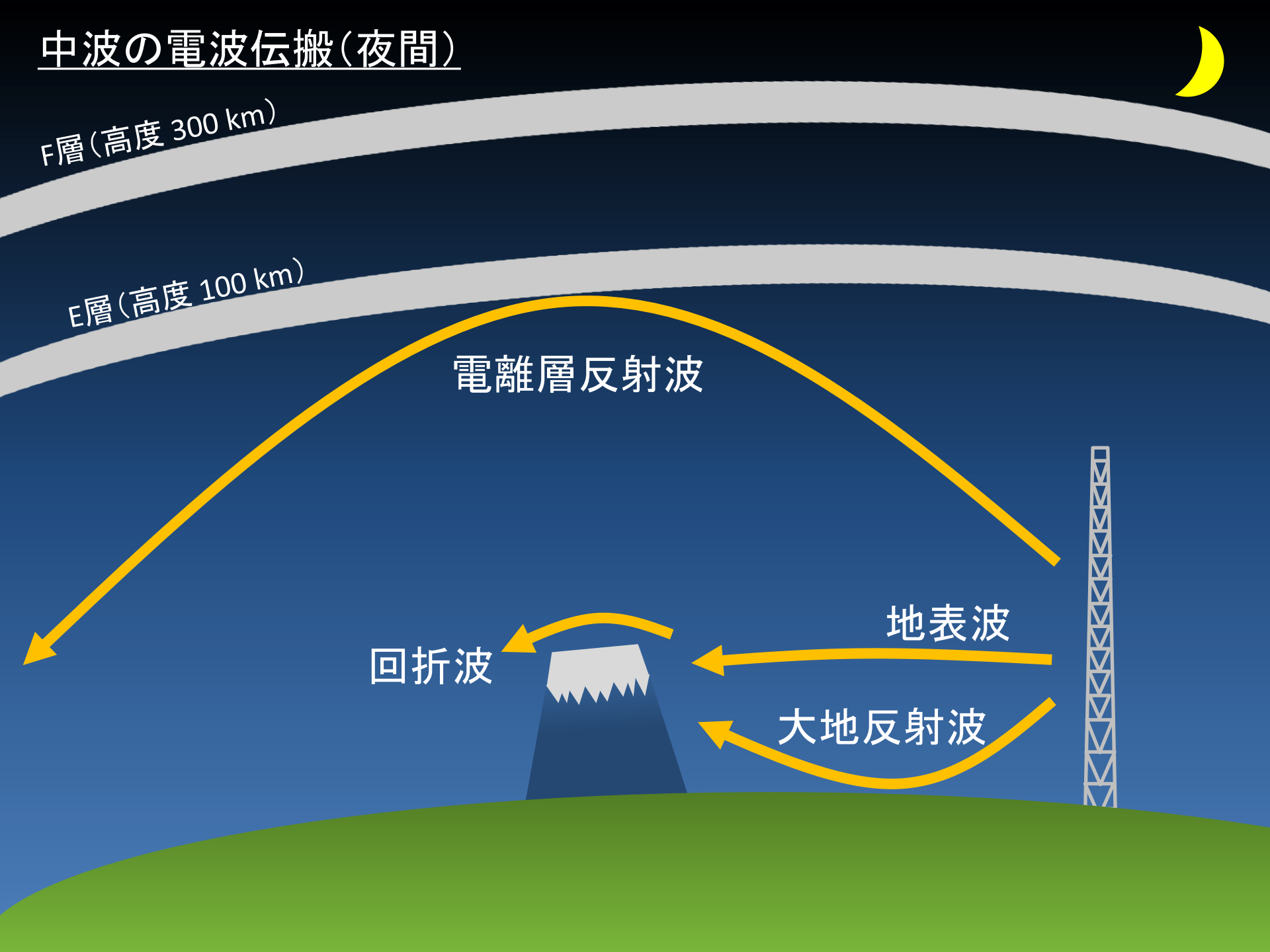
E層(高度 100 km)

電離層反射波

地表波

回折波

大地反射波



# 短波の電波伝搬(昼間)



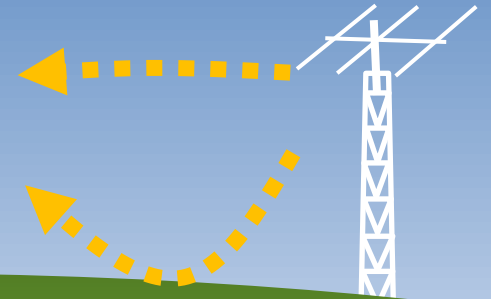
F層(高度 300 km)

E層(高度 100 km)

D層(高度 80 km)

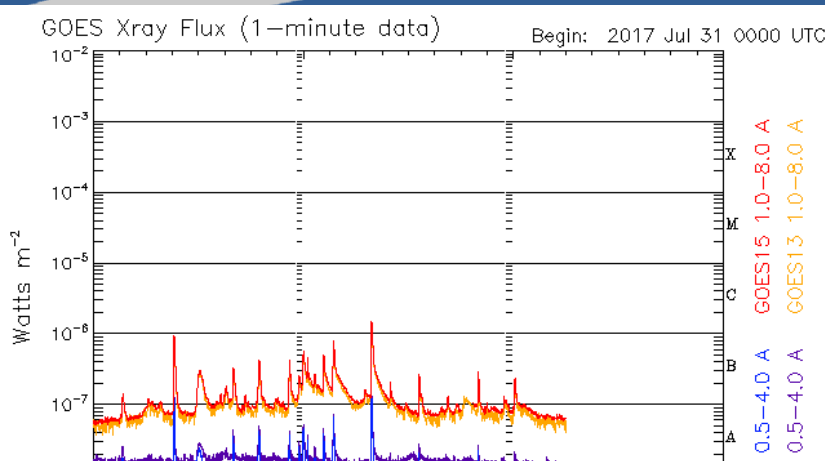
10~30 MHz

3~10 MHz



# デリンジャー現象

F層(高度 300 km)



起きてしまったらどうしようもないため、  
いつ回復するかに注目が集まる

指標: X-ray Flux

## SWC 宇宙天気情報センター

Japan Space Weather Information Center

RSS
用語集
English

HOME
臨時情報
最新の宇宙天気データ
予報
お問い合わせ

HOME >> 最新の宇宙天気データ >> 無線通信ケア情報

無線通信
衛星運用
電力・磁気探査
GPS
航空機関係
黒点
27日周期
宇宙環境

2017/07/03 20:43:26 JST

自動更新を選択すると、10分毎にページがリロードされます。→ [手動更新](#) | [自動更新](#)

### 無線通信ケア情報

データ日時: 2016/09/07 22:00:00(JST)

deficit or updating

(参考データ: [グラフ](#))

---

データ日時: 2017/07/03 20:25:00(JST)

発生していません。

(参考データ: [グラフ](#))

[デリンジャー現象現況マップ](#)

---

データ日時: 2017/07/03 20:30:00(JST)

権内 : 臨界周波数:12.6[MHz]

国分寺: 発生していません。臨界周波数:2.7[MHz]

山川: 発生していません。臨界周波数:3.8[MHz]

沖縄: deficit or updating

### デリンジャー現象情報

データ日時: 2017/07/03 20:25:00(JST)

発生していません。

(参考データ: [グラフ](#))

[デリンジャー現象現況マップ](#)

### スプラディックE層情報

時刻	電流	スプラディックE層
JST	nT	
12/3	1.4 10 <sup>4</sup>	スプラディックE層: 電離圏E領域の狭い高度領域に突発的に現れる電子密度の濃い領域で高い周波数の電波まで反射して混信障害を起こすことがあります。夏季に多く出現します。
12/2	2.4 10 <sup>4</sup>	

### 磁気圏 (NICT)

時刻	速度	南北
JST	km/s	磁場
12/6	—	—
12/5	1456	C1.2
	02:33	C1.8
12/4	16:04	C1.2
	11:46	C1.1

### フレア (GOES)

発生	時刻	強度
日	JST	検出
12/6	—	—
12/5	02:33	C1.8
12/4	16:04	C1.2
	11:46	C1.1

### 太陽風 (ACE)

時刻	速度	南北
JST	km/s	磁場
12/6	—	—
12/5	1456	C1.2
	02:33	C1.8
12/4	16:04	C1.2
	11:46	C1.1

### 無線通信ケア情報

0.5-4.0 A GOES15 1.0-8.0 A

0.5-4.0 A GOES13 1.0-8.0 A

### GOES Xray Flux (1-minute data)

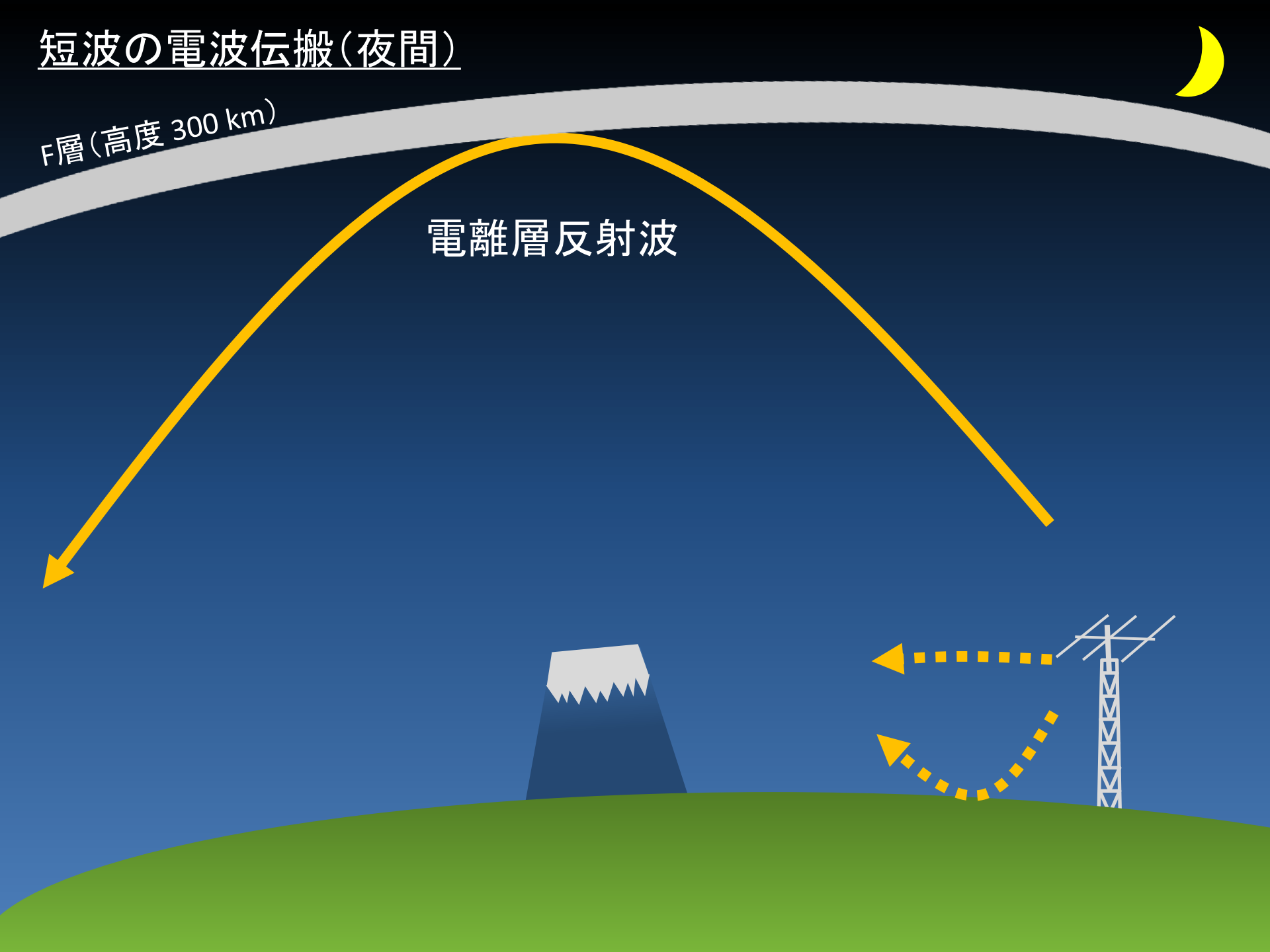
Begin: 2017 Jul 31 0000 UTC

Watts m<sup>-2</sup>

# 短波の電波伝搬(夜間)

F層(高度 300 km)

電離層反射波



# 超短波～の電波伝搬



F層(高度 300 km)

E層(高度 100 km)

D層(高度 80 km)

FMラジオ

航空無線

船舶無線

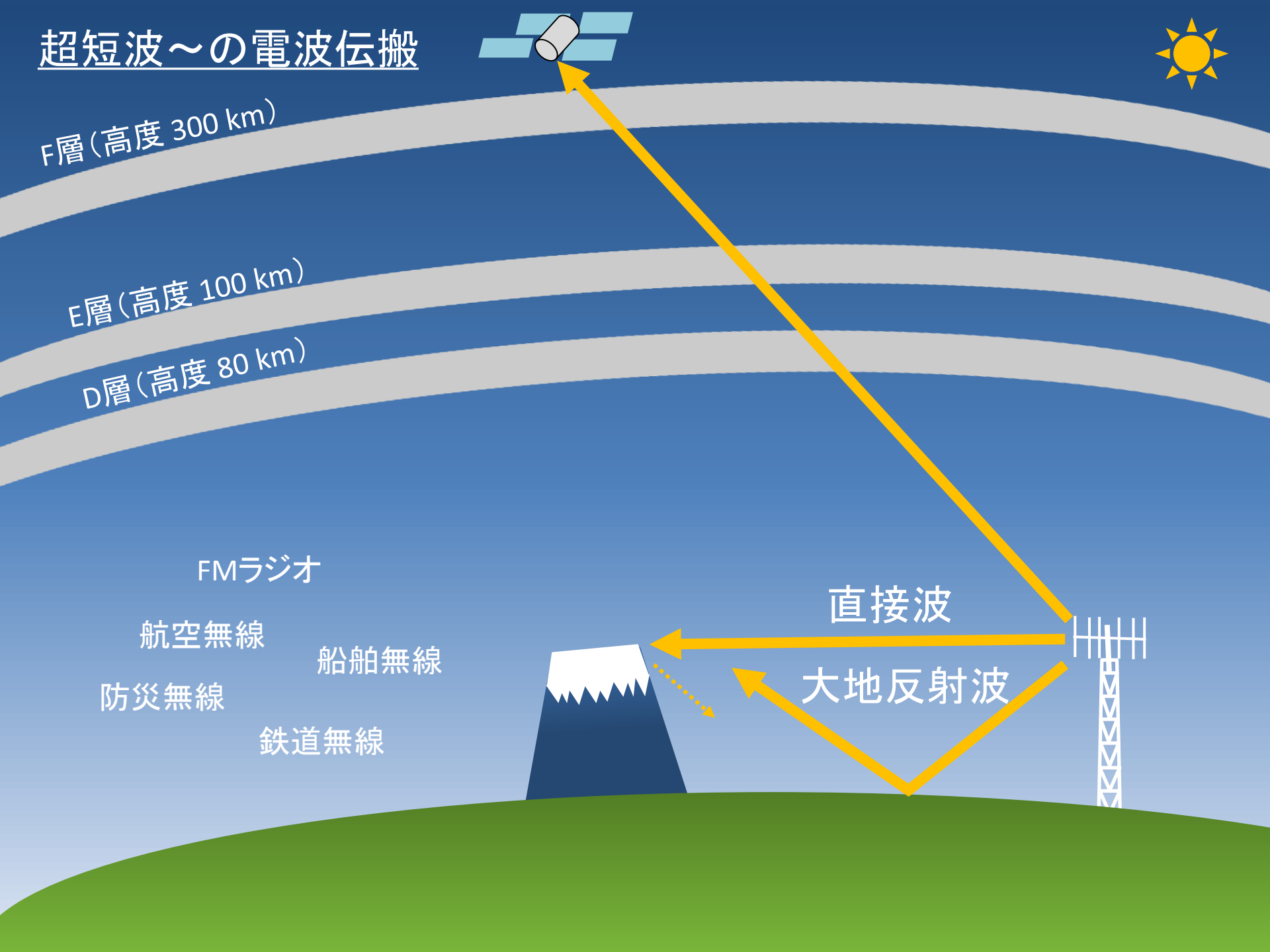
防災無線

鉄道無線



直接波

大地反射波



# 超短波の異常伝搬



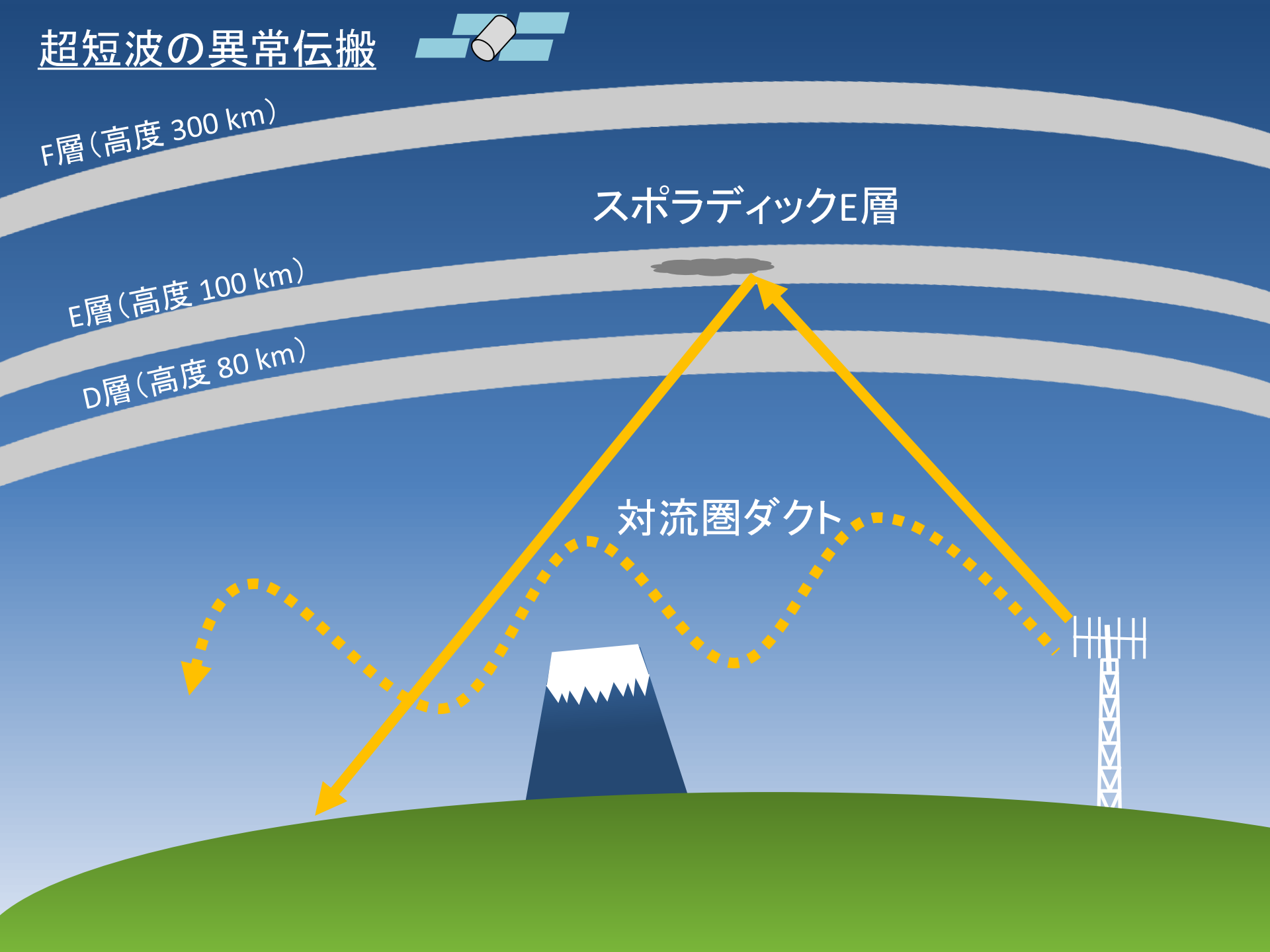
F層(高度 300 km)

E層(高度 100 km)

D層(高度 80 km)

スプラディックE層

対流圏ダクト



🕒 2014/8/8 05:30

## 📌 神戸のK i s s F M、突然中国語放送に

🐦 ツイート 93

👍 おすすめ 145

🖨️ 印刷



[神戸新聞Next, 2014年8月8日]

宇宙天気情報  
BOX  
小・中・大・携  
更新停止中  
太陽フレア:更新  
停止中。  
太陽風:更新停  
止中

無線通信 衛星運用 電力・磁気探査 GPS 航空機関係 黒点 27日周期 宇宙環境

無線通信ケア情報

2017/07/03 20:43:26 JST

自動更新を選択すると、10分毎にページがリロードされます。→ 手動更新 自動更新

# Nowcast

## スプラディックE層情報

データ日時:2017/07/03 20:30:00(JST)

稚内 : **臨界周波数:12.6[MHz]**  
国分寺: 発生していません。臨界周波数:2.7[MHz]  
山川 : 発生していません。臨界周波数:3.8[MHz]  
沖縄 : deficit or updating



ここでは、臨界周波数値が4.5MHz以上のとき「スプラディックE層が存在する」と定義しており、臨界周波数値が8MHzを超えた場合「強いスプラディックE層が存在する」としてあります。

07 22:00:00(JST)

ラフ)

03 20:25:00(JST)

ラフ)

況マップ

03 20:30:00(JST)

12.6[MHz]

ません。臨界周波

ません。臨界周波

山川 国分寺 沖縄

deficit or updating

ここでは、臨界周波数値が4.5MHz以上のとき「スプラディックE層が存在する」と定義しており、臨界周波数値が8MHzを超えた場合「強いスプラディックE層が存在する」としてあります。

06:30	-	-/-
-2h	-	-/-
-4h	-	-/-
-6h	-	-/-
-8h	-	-/-
-10h	-	-/-
-12h	-	-/-

放射線 (GOES)

時刻 JST	プロット 10MeV	電子 2MeV
最新	02	3x10 <sup>3</sup>
12/6	03	4x10 <sup>3</sup>
12/5	05	1x10 <sup>4</sup>
12/4	04	1x10 <sup>4</sup>
12/3	04	1x10 <sup>4</sup>
12/2	04	2x10 <sup>4</sup>

現在の電離圏概況  
電波伝搬障害研究プロジェクト

地磁気嵐情報 : 地磁気嵐に伴って電離圏F領域の臨界周波数値が減少(電離圏負相風)して短波帯の通信状態が悪くなることがあります。これには季節依存性があり特に夏にこのような影響が出やすくなります。

デリンジャー現象: フレアと呼ばれる太陽の爆発現象により昼間側で電離圏D領域の電離が進んで短波帯の電波が吸収され通信ができなくなることがあります。

スプラディックE層: 電離圏E領域の狭い高度領域に突発的に現れる電子密度の濃い領域で高い周波数の電波まで反射して混信障害を起こすことがあります。

# 電離圏と宇宙天気

# 電離層は地球を包む

電離層



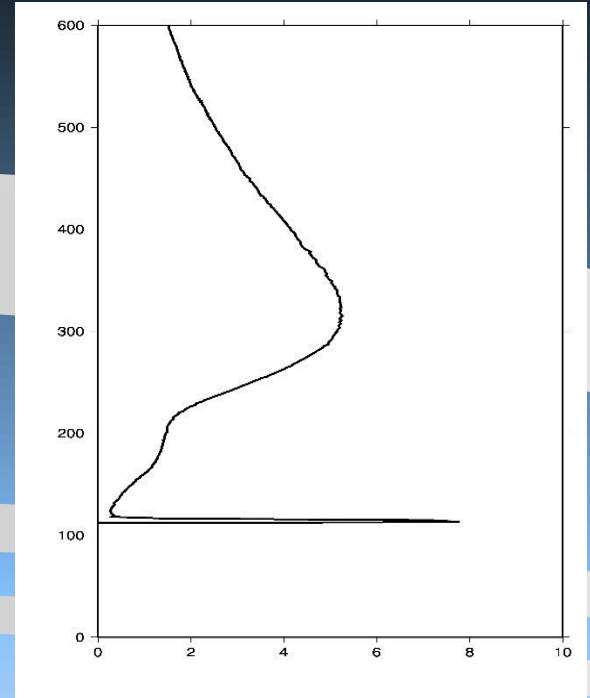
# 電離「層」という概念

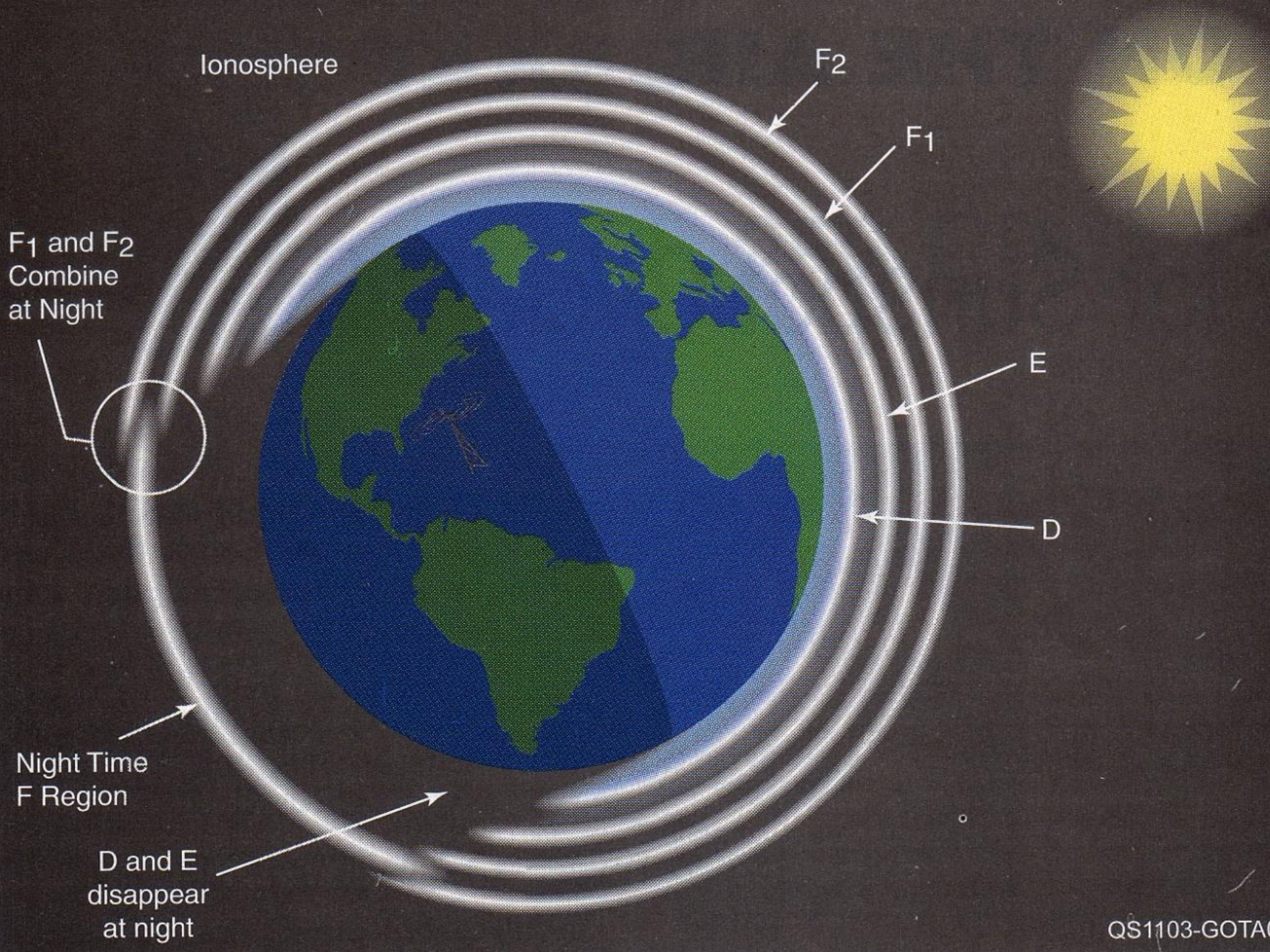
F 層 250~400 km

E 層 90~120 km

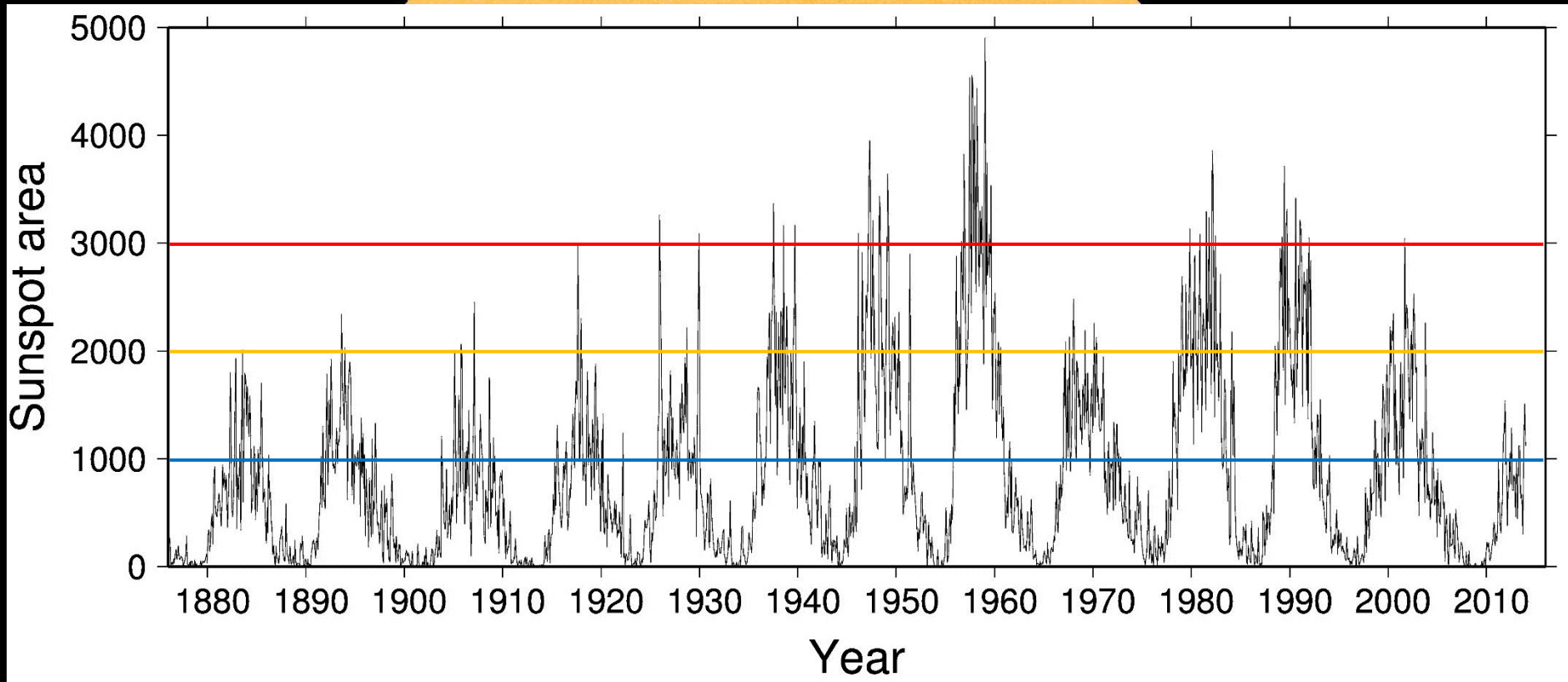
Es 層

D 層 70~90 km

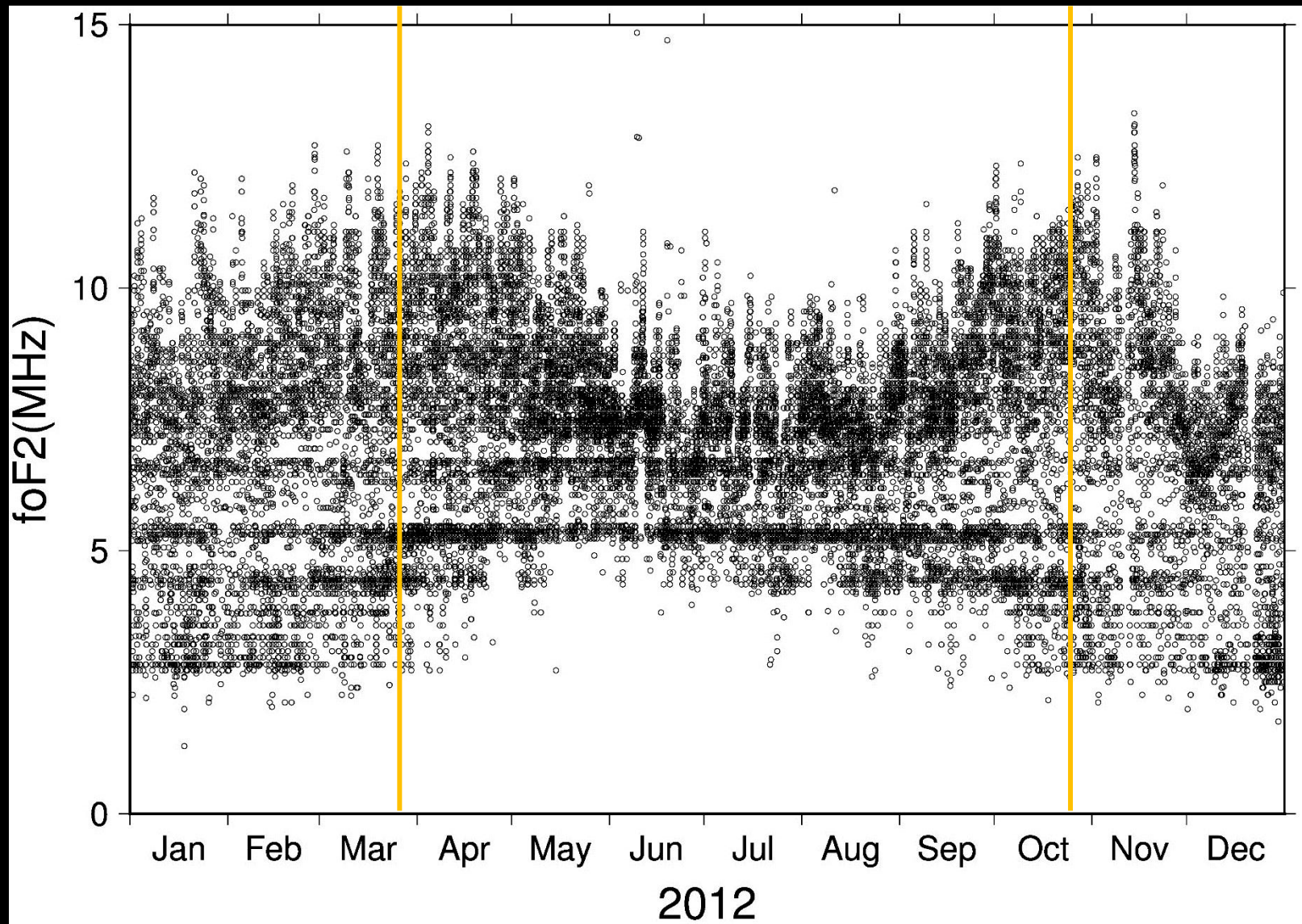




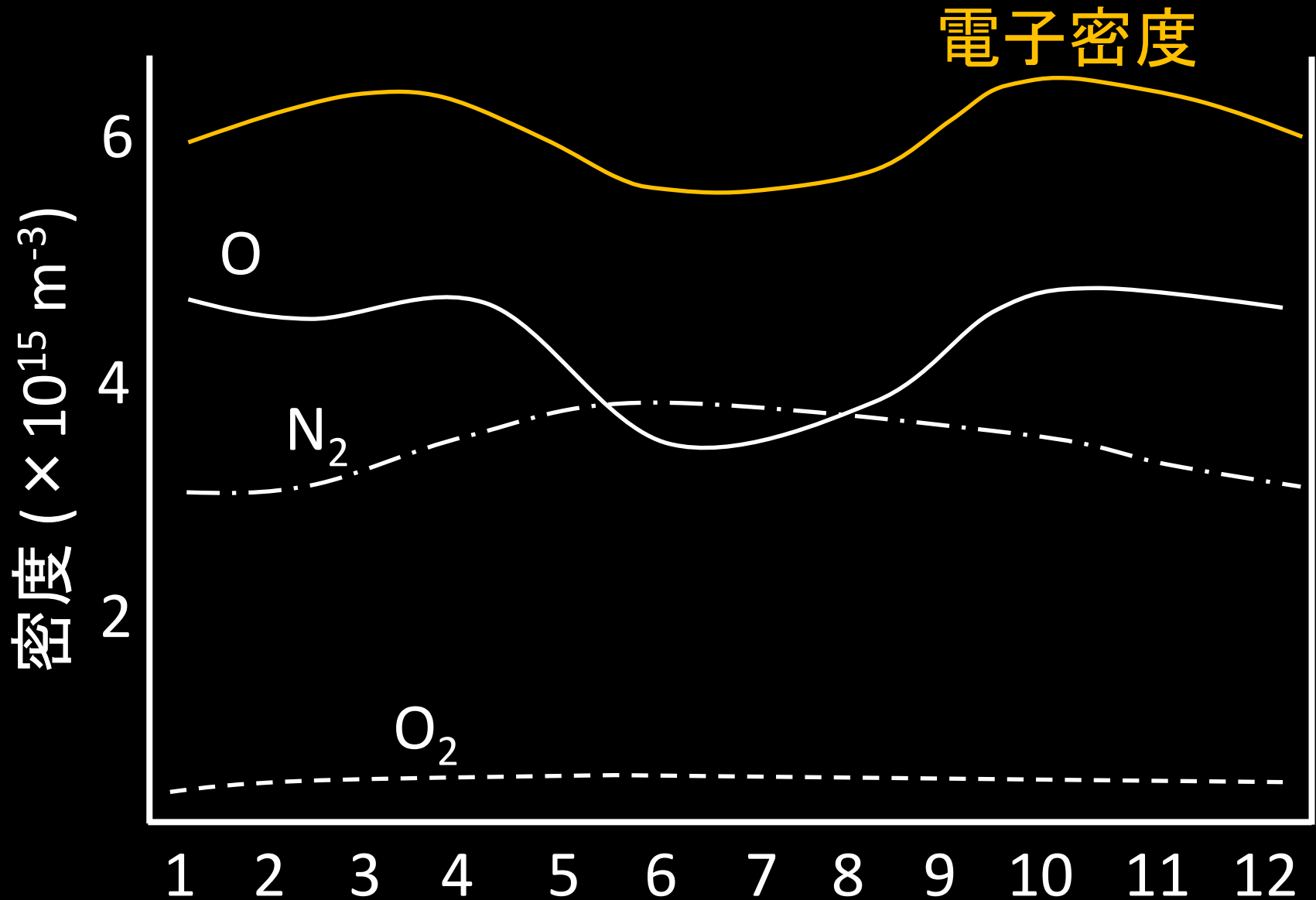
# 太陽活動と電離圏(年変動)



# 電離圏の季節変動



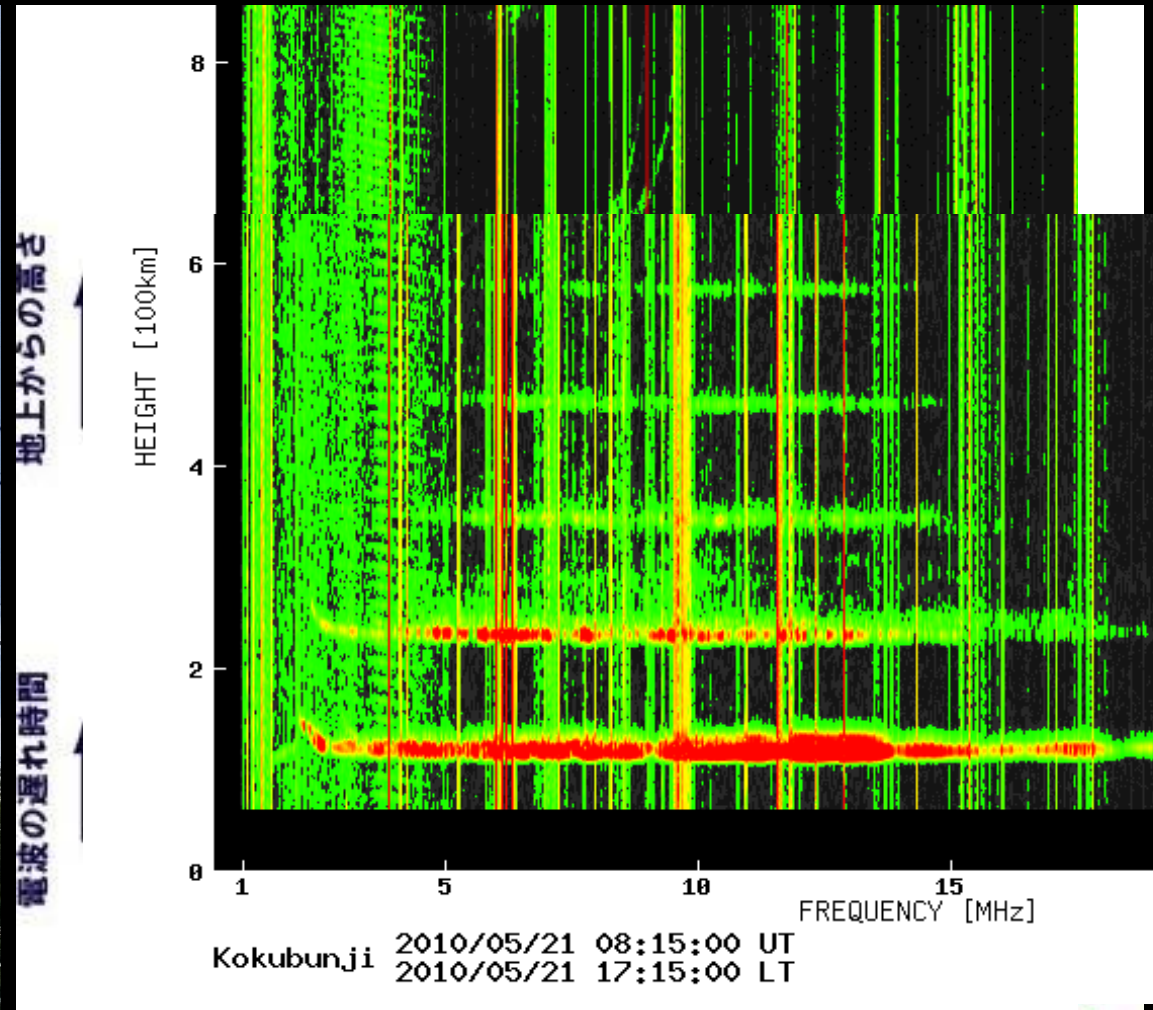
# 大気組成の季節変動(北半球)



# 短波帯電波伝搬

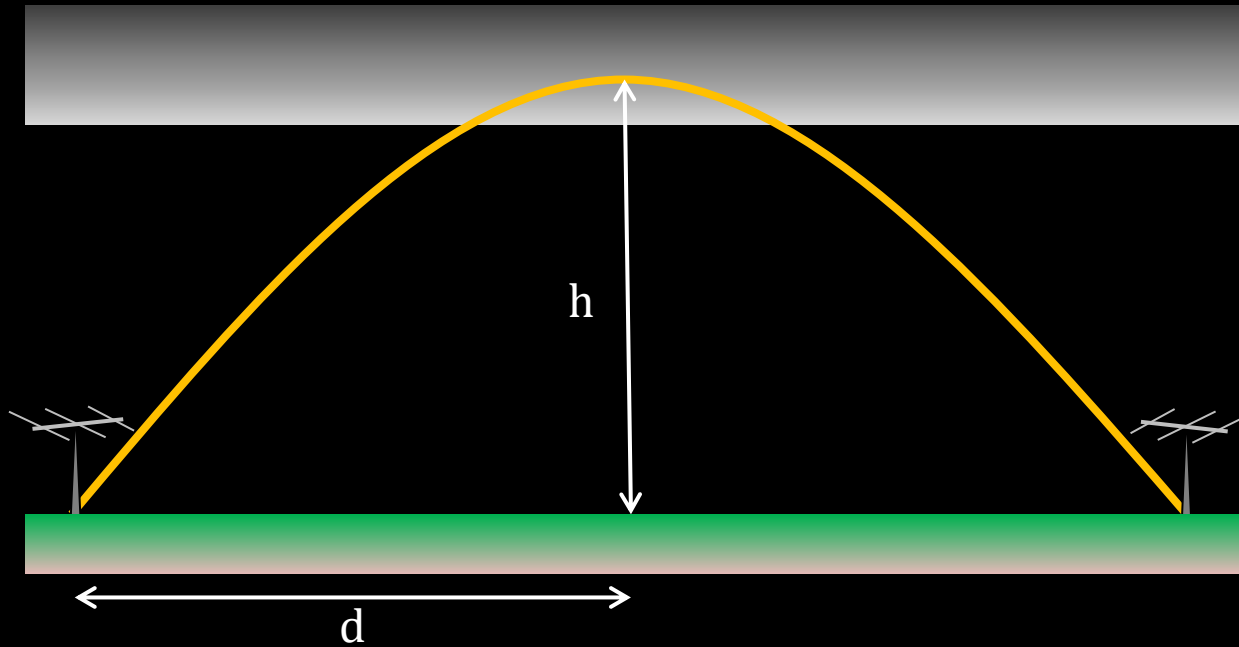


# イオゾンデによる観測とイオノグラム



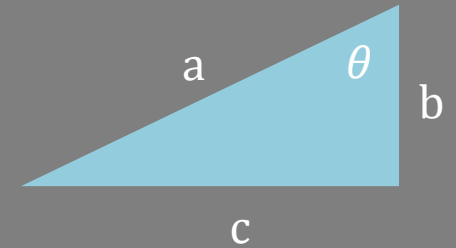
$f_c$ : 臨界周波数(垂直入射で反射が得られる最大周波数)

# 斜入射による電離層反射



$$f_{MUF} = f_c \sec \theta$$

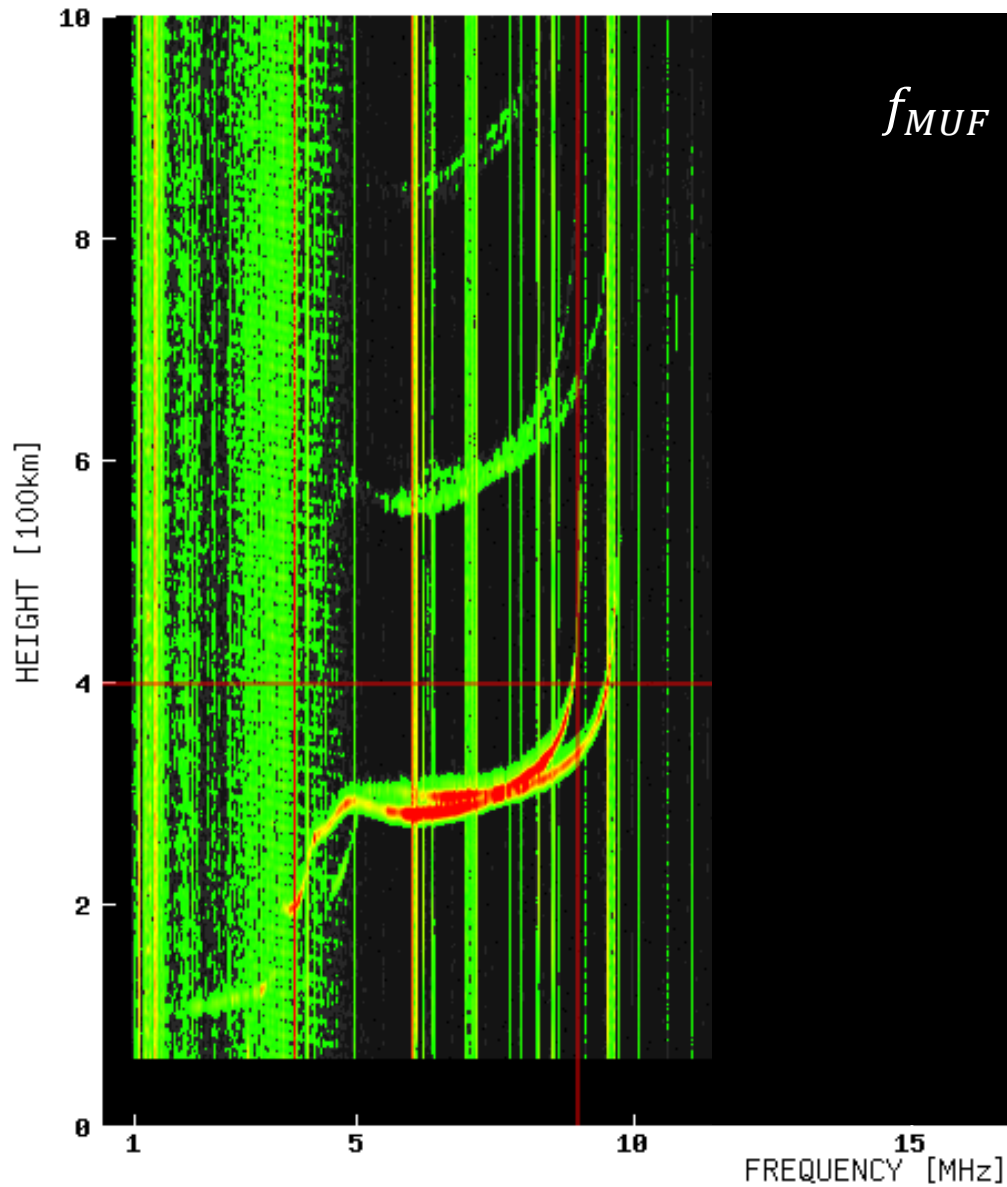
$$= f_c \frac{\sqrt{(d^2 + h^2)}}{h}$$



$$\begin{aligned} \sec \theta &= \frac{1}{\cos \theta} \\ &= \frac{\sqrt{(a^2 + b^2)}}{b} \end{aligned}$$

FREQ.(HMz): 9.00

HEIGHT(Km): 400



$$f_{MUF} = f_c \sec \theta$$

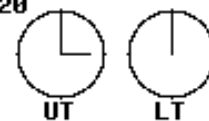
$$= f_c \frac{\sqrt{(d^2 + h^2)}}{h}$$

$$= 9.0 \frac{\sqrt{(d^2 + 400^2)}}{400}$$

$$= 9.0 \frac{\sqrt{(800^2 + 400^2)}}{400}$$

$$= 20.1 \text{ (MHz)}$$

Kokubunji 2016/03/21 03:00:00 UT  
2016/03/21 12:00:00 LT



F層

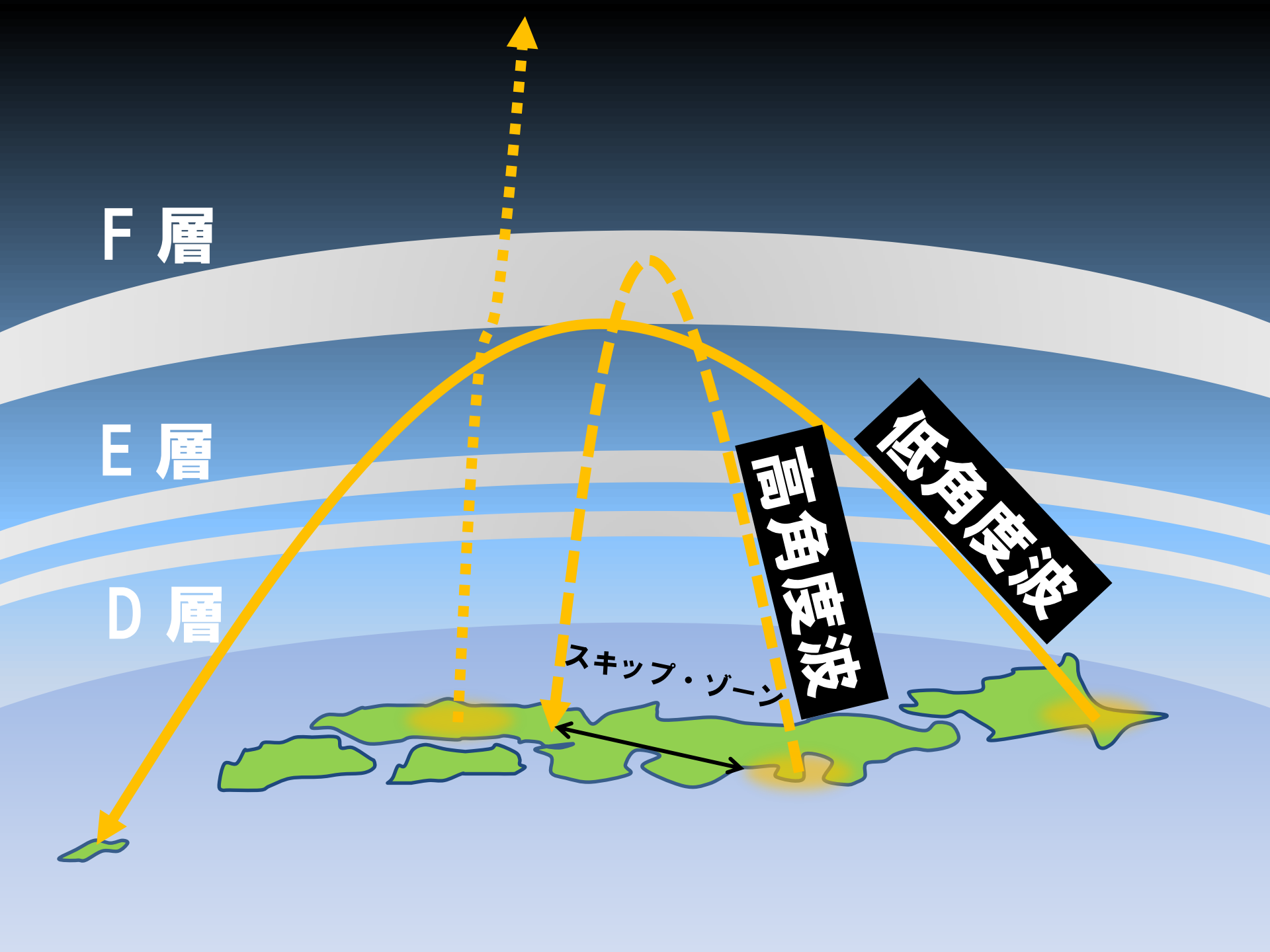
E層

D層

スキップ・ゾーン

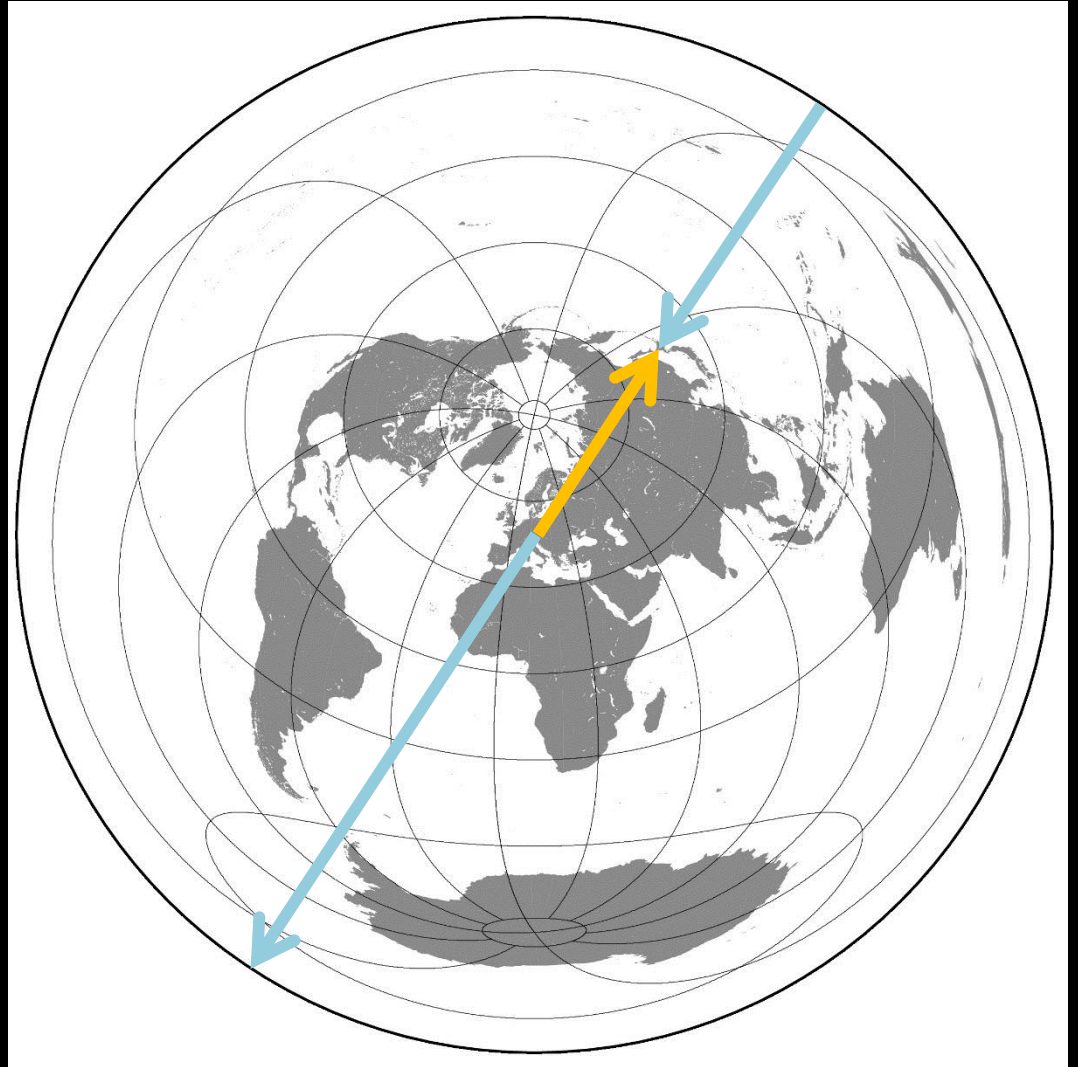
高角度波

低角度波



# 大圏コースパス

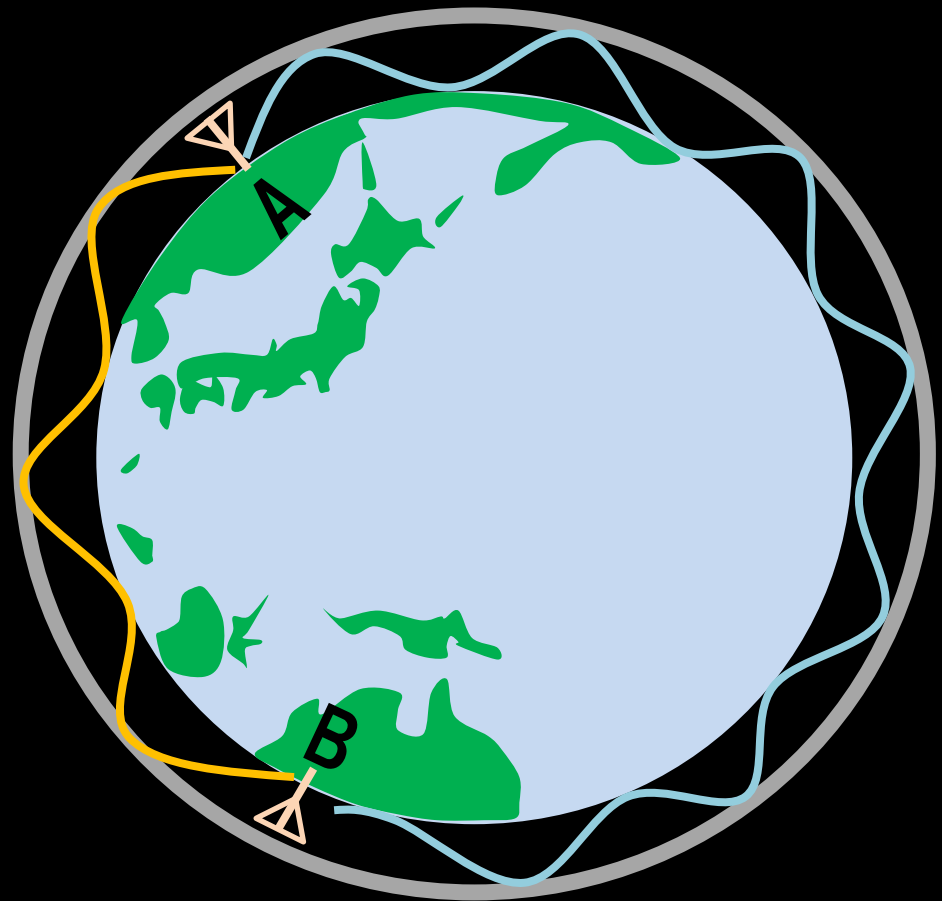
ショートパス  
ロングパス



# 大圏コースパス

ショートパス

ロングパス



ロングパス

# ロングパスの例



★  
日本

ロングパス  
22,500 km

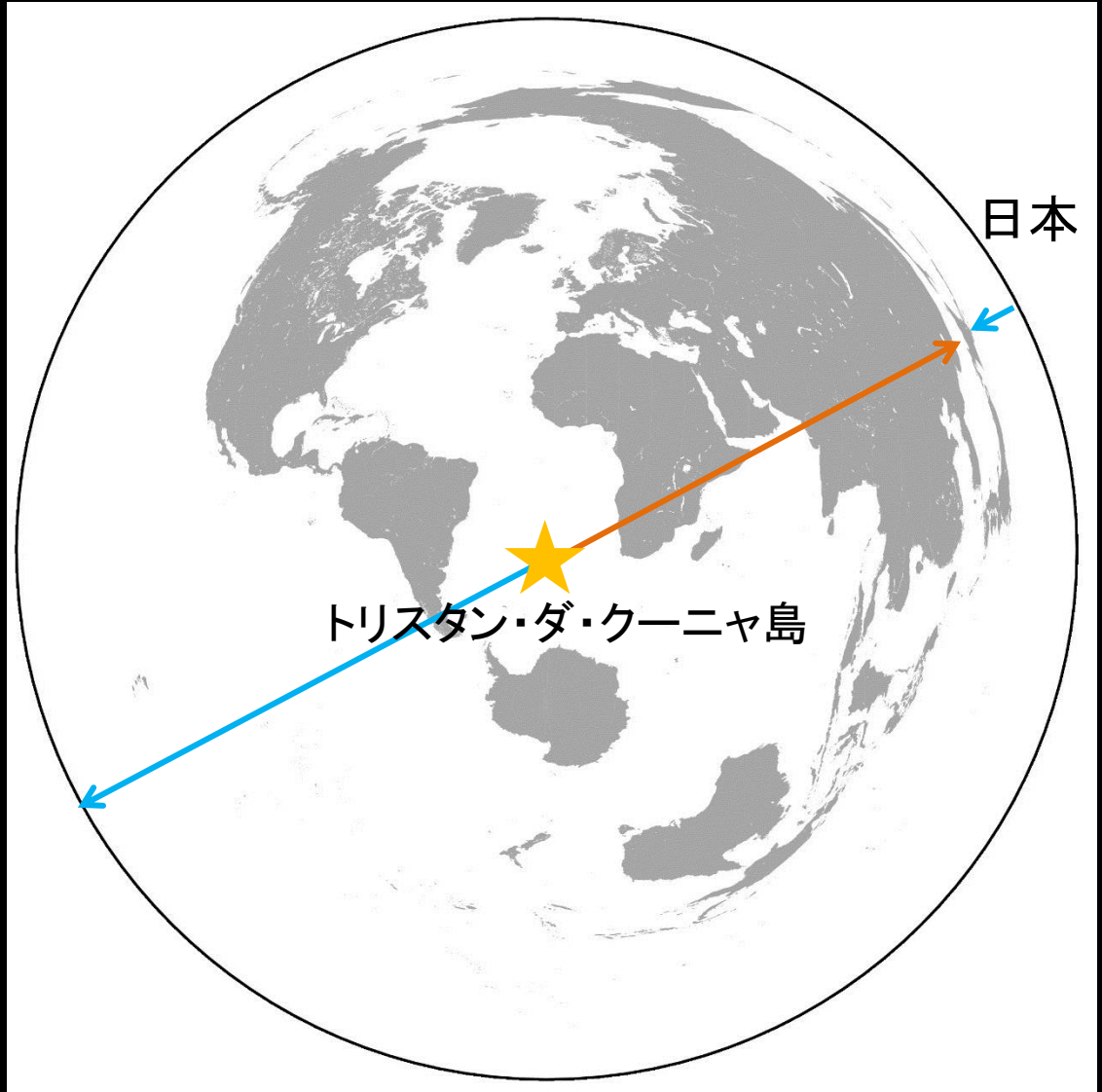
★  
トリスタン・ダ・クーニャ島

# なぜロングパスが重要か



- ・経路長  
LP > 3 SP

- ・一見LPは不利

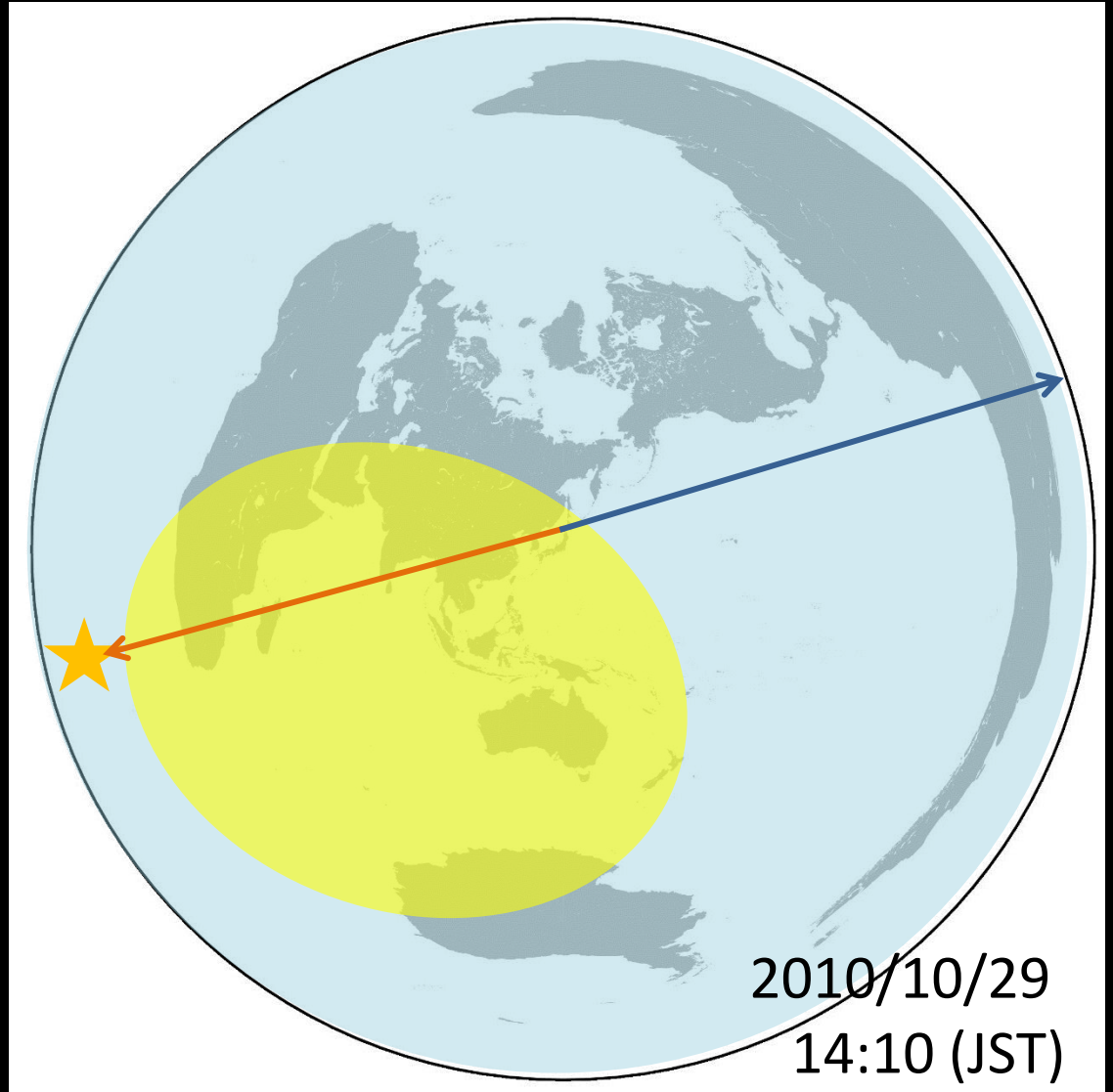


# ショートパス上の損失



# なぜロングパスが重要か

- ・SPは昼間帯  
D・E層あり
- ・LPは夜間帯  
D・E層なし



# ロングパス上の損失

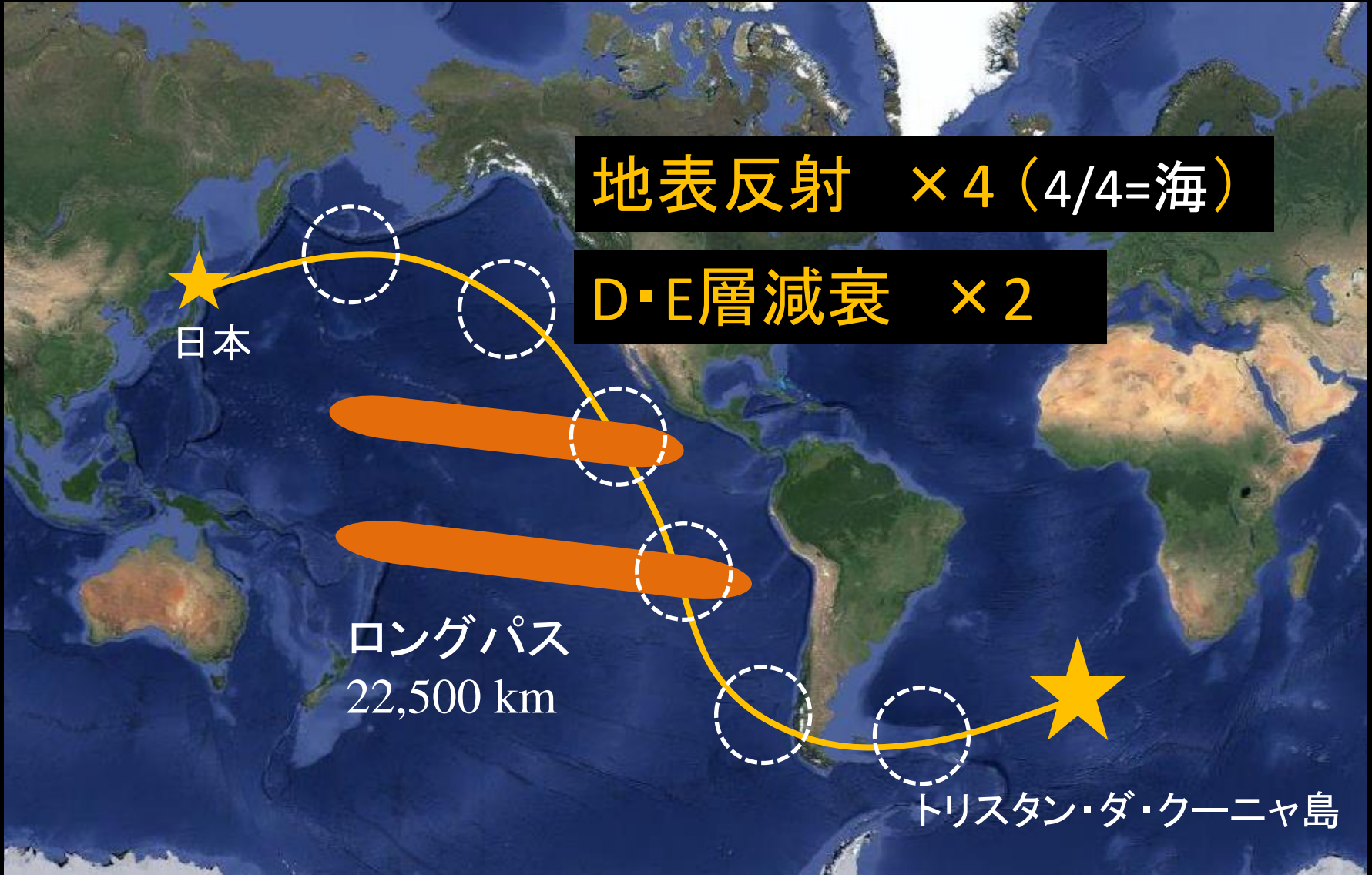
地表反射 × 4 (4/4=海)

D・E層減衰 × 2

日本

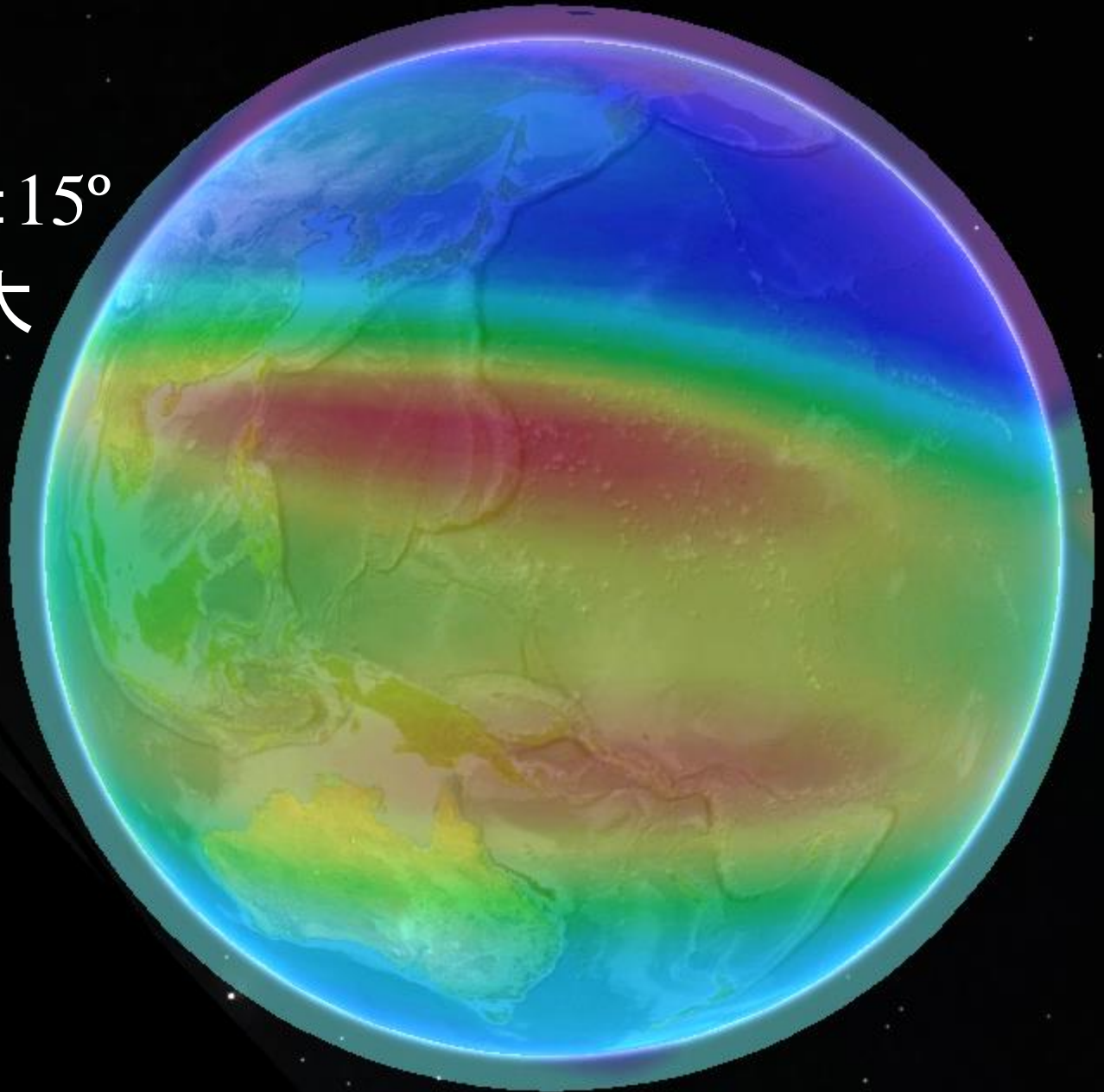
ロングパス  
22,500 km

トリスタン・ダ・クーニャ島



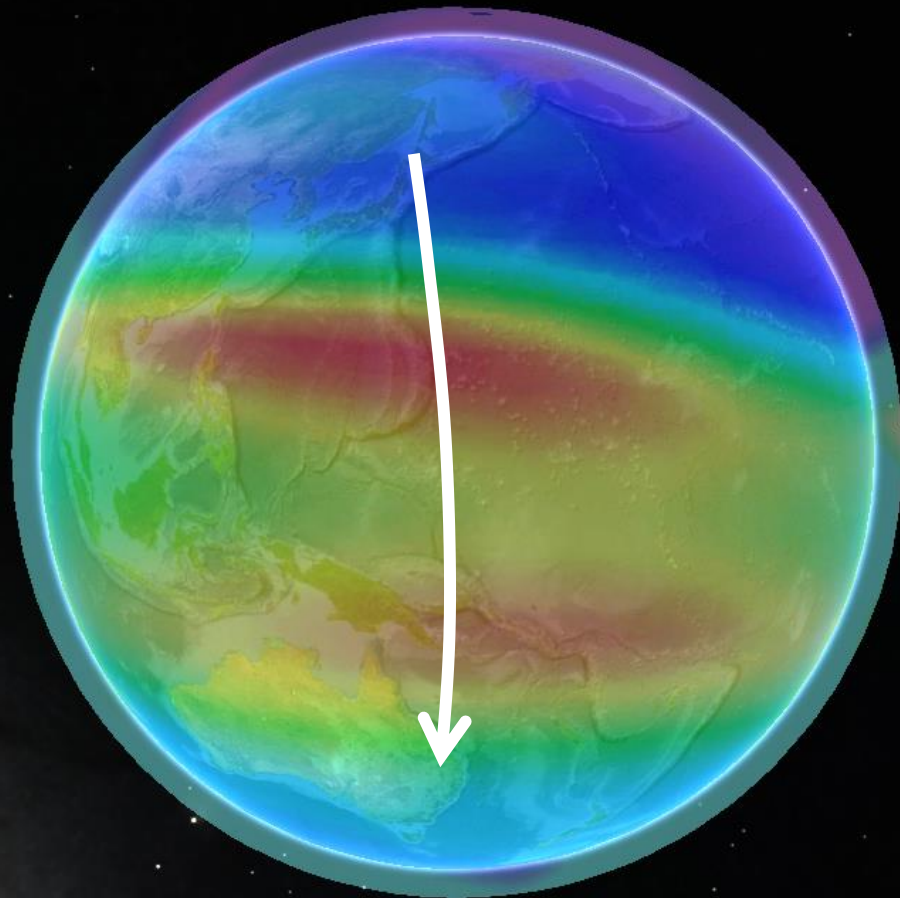
# 赤道異常

- ・磁気赤道から $\pm 15^\circ$
- ・電子密度が極大



# 赤道異常

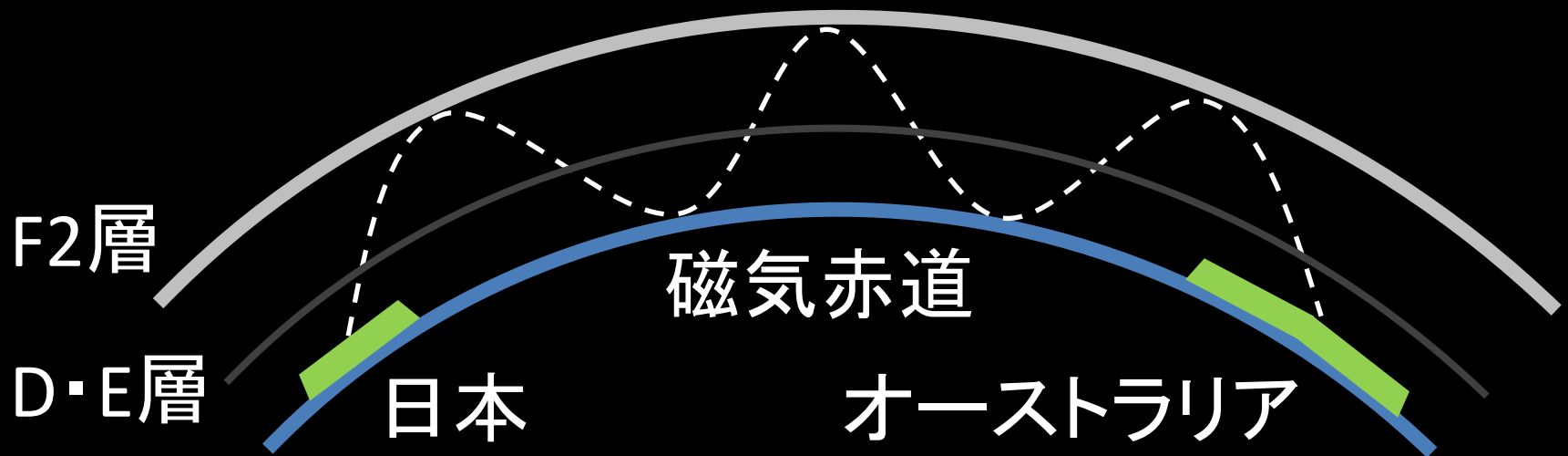
HF~VHFで赤道横断伝搬が可能  
(TEP: trans-equatorial propagation)



# 赤道横断伝搬の効果

TEPなしの場合

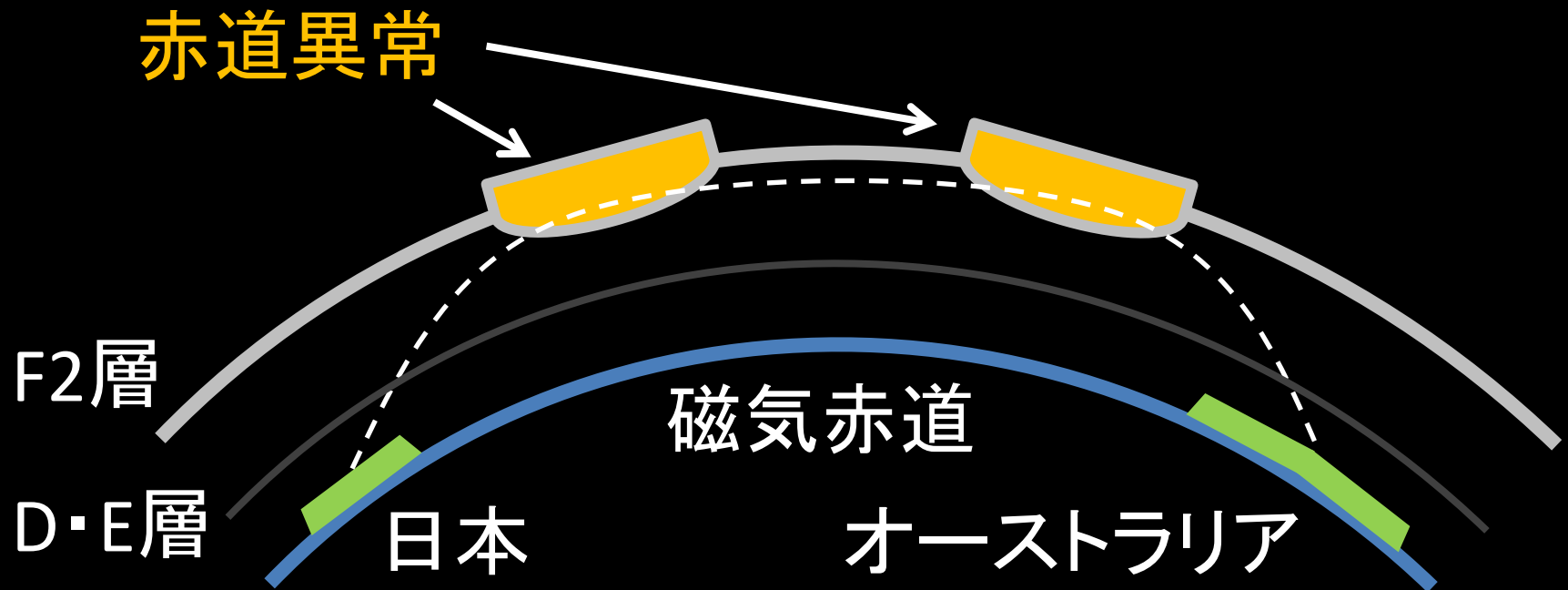
- ・D・E層による減衰 6回
- ・地表反射 2回



# 赤道横断伝搬の効果

TEPありの場合

- ・D・E層による減衰 2回
- ・地表反射 0回



# 伝搬損失の比較

	SP	LP
地表反射	4回 (6dB × 4)	4回 (3dB × 4)
D・E層による減衰	10回 (3dB × 10)	2回 (3dB × 2)
Sメータ	-6 (36dB)	-3 (18dB)

# ロングパス上の損失

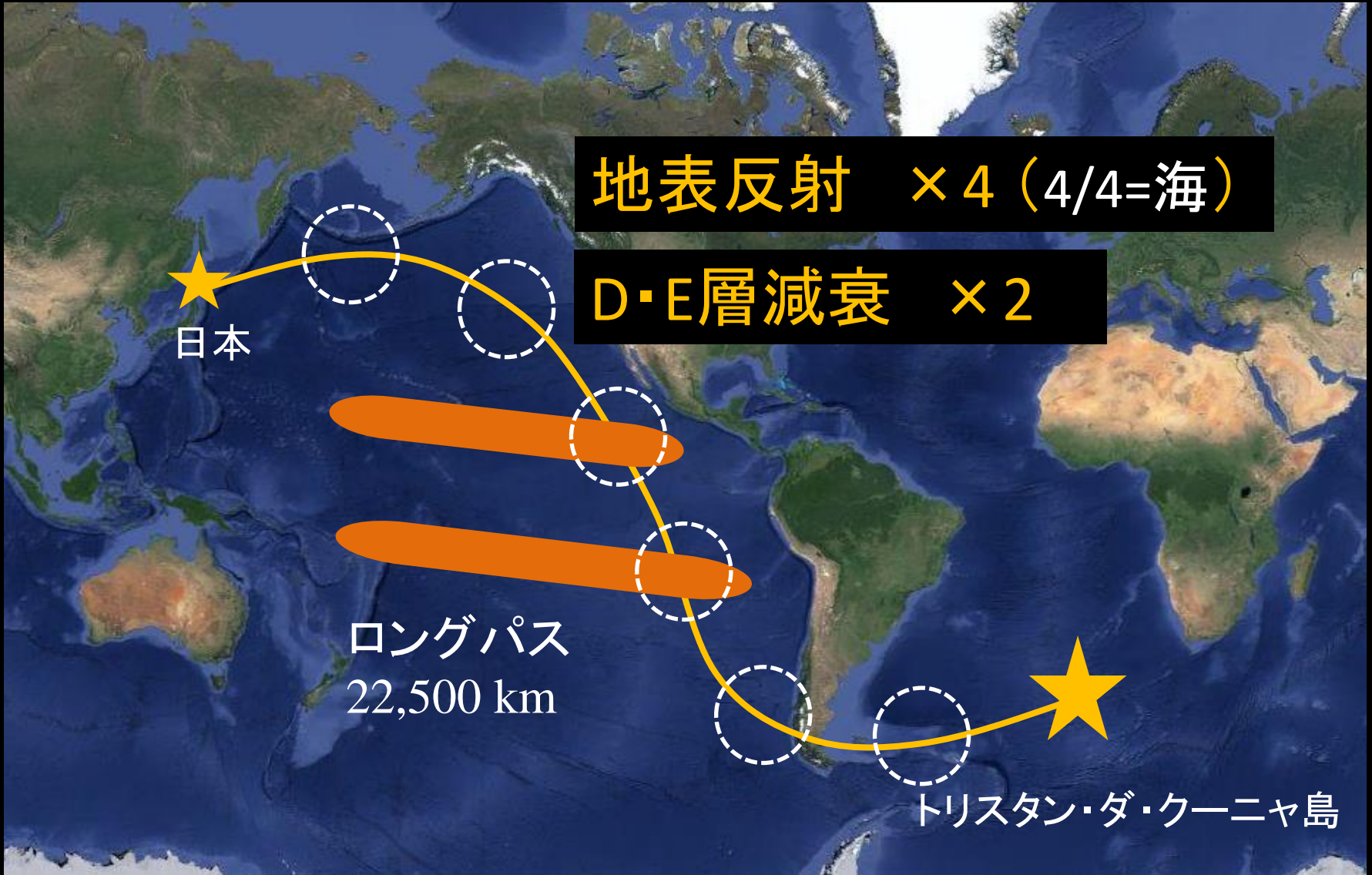
地表反射 × 4 (4/4=海)

D・E層減衰 × 2

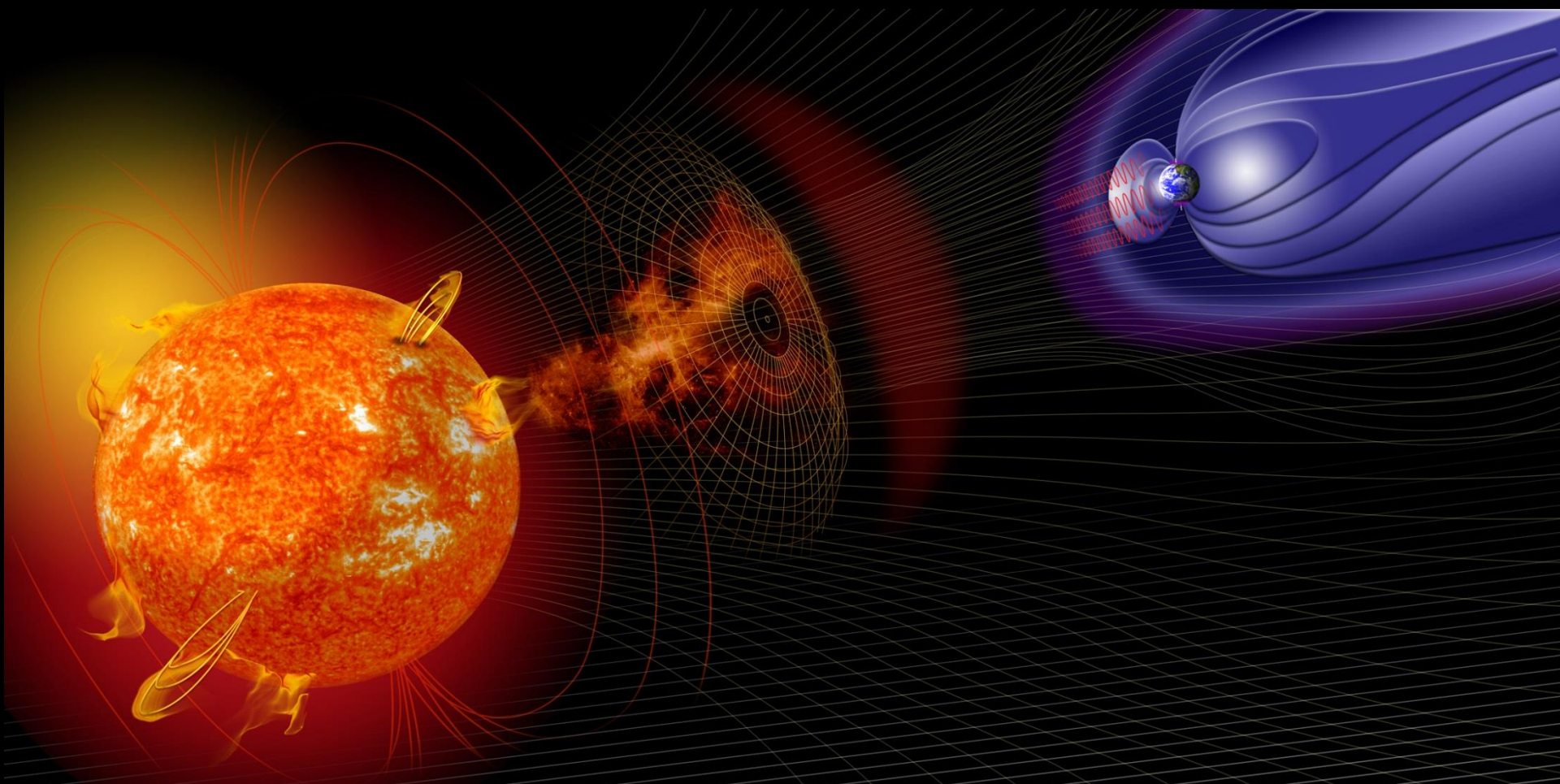
日本

ロングパス  
22,500 km

トリスタン・ダ・クーニャ島



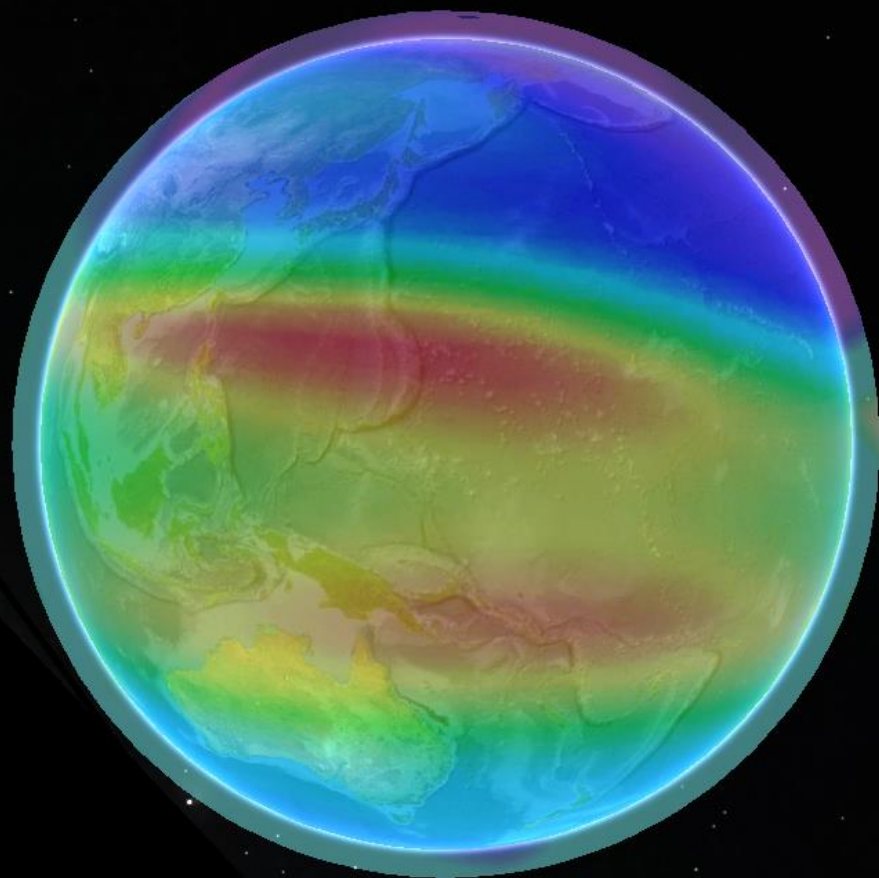
Space weather? That's not enough.



# 全球的な電離圏状態の把握が必要

細かな時空間分解能

海上の電離圏観測が課題



# Nowcast

## スποラディックE層情報

データ日時:2017/07/03 20:30:00(JST)

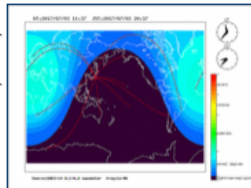
稚内 : **臨界周波数:12.6[MHz]**  
 国分寺: 発生していません。臨界周波数:2.7[MHz]  
 山川 : 発生していません。臨界周波数:3.8[MHz]  
 沖縄 : deficit or updating



ここでは、臨界周波数値が4.5MHz以上のとき「スποラディックE層が存在する」と定義しており、臨界周波数値が8MHzを超えた場合「強いスποラディックE層が存在する」としております。


07 22:00:00(JST)

03 20:25:00(JST)



03 20:30:00(JST)

12.6[MHz]



06:30	-	-/-
-2h	-	-/-
-4h	-	-/-
-6h	-	-/-
-8h	-	-/-
-10h	-	-/-
-12h	-	-/-

放射線 (GOES)

時刻 JST	プロトン 10MeV	電子 2MeV
最新	02	3x10 <sup>3</sup>
12/6	03	4x10 <sup>3</sup>
12/5	05	1x10 <sup>4</sup>
12/4	04	1x10 <sup>4</sup>
12/3	04	1x10 <sup>4</sup>
12/2	04	2x10 <sup>4</sup>

ここでは、臨界周波数値が4.5MHz以上のとき「スποラディックE層が存在する」と定義しており、臨界周波数値が8MHzを超えた場合「強いスποラディックE層が存在する」としております。

現在の電離圏概況  
電波伝搬障害研究プロジェクト

地磁気嵐情報 : 地磁気嵐に伴って電離圏F領域の臨界周波数値が減少(電離圏負相成)して短波帯の通信状態が悪くなることがあります。これには季節依存性があり特に夏にこのような影響が出やすくなります。

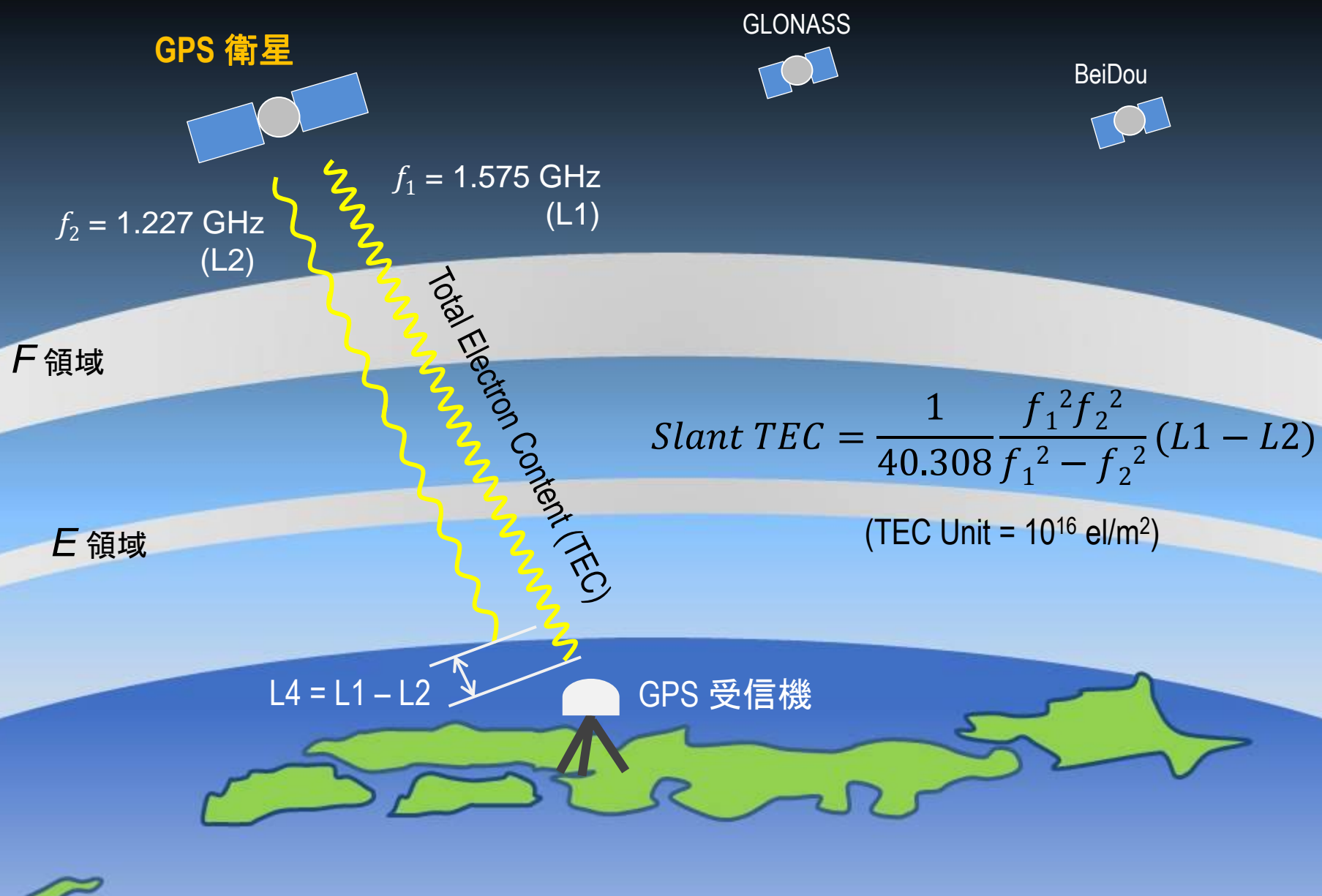
デルタ現象: フレアと呼ばれる太陽の爆発現象により昼間側で電離圏D領域の電離が進んで短波帯の電波が吸収され通信ができなくなることがあります。

スποラディックE層: 電離圏E領域の狭い高度領域に突発的に現れる電子密度の濃い領域で高い周波数の電波まで反射して混信障害を起こすことがあります。

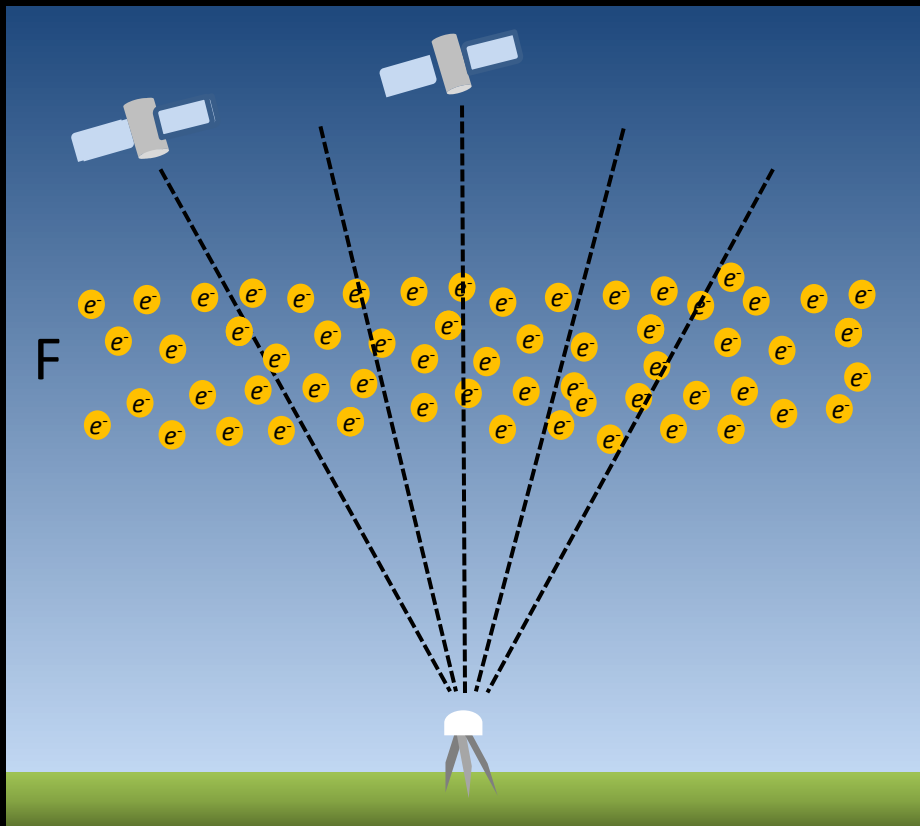
夏季に多く出現します

# Forecast ?

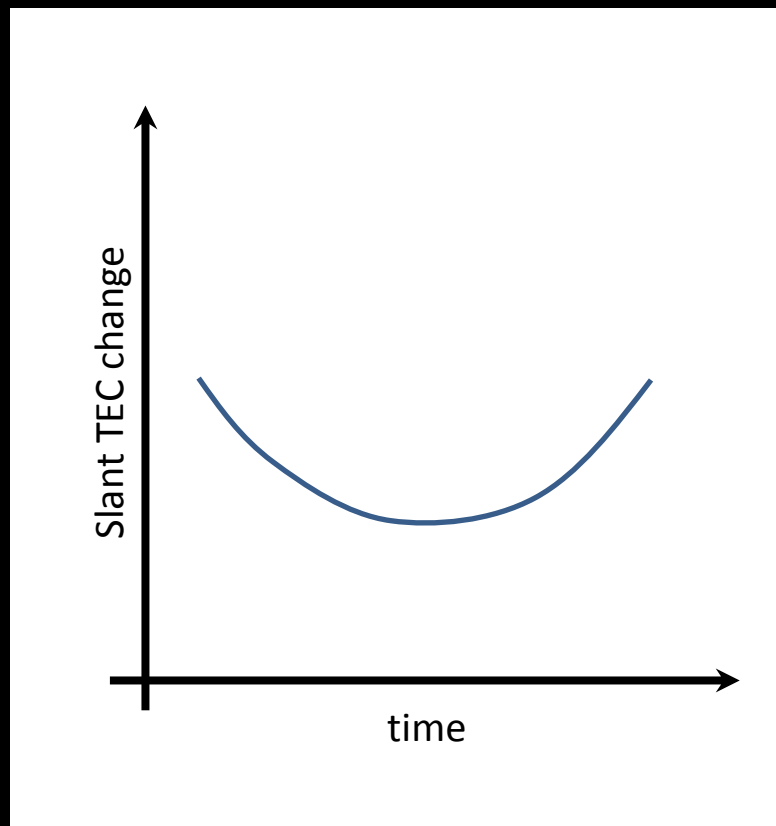
# SHF帯の電波伝搬と電離圏観測への利用



# 計測原理 (1)

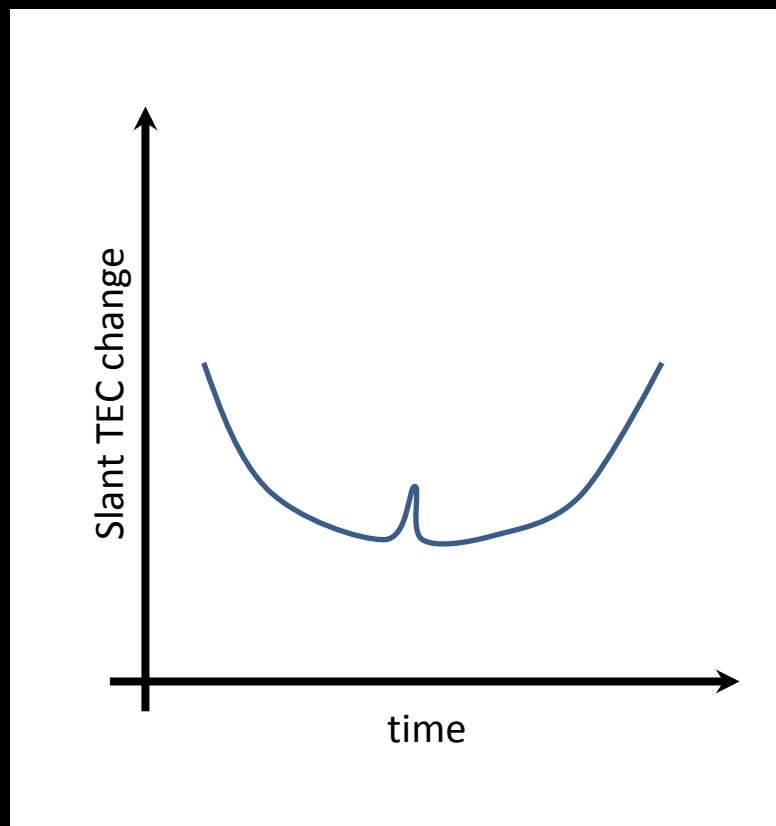
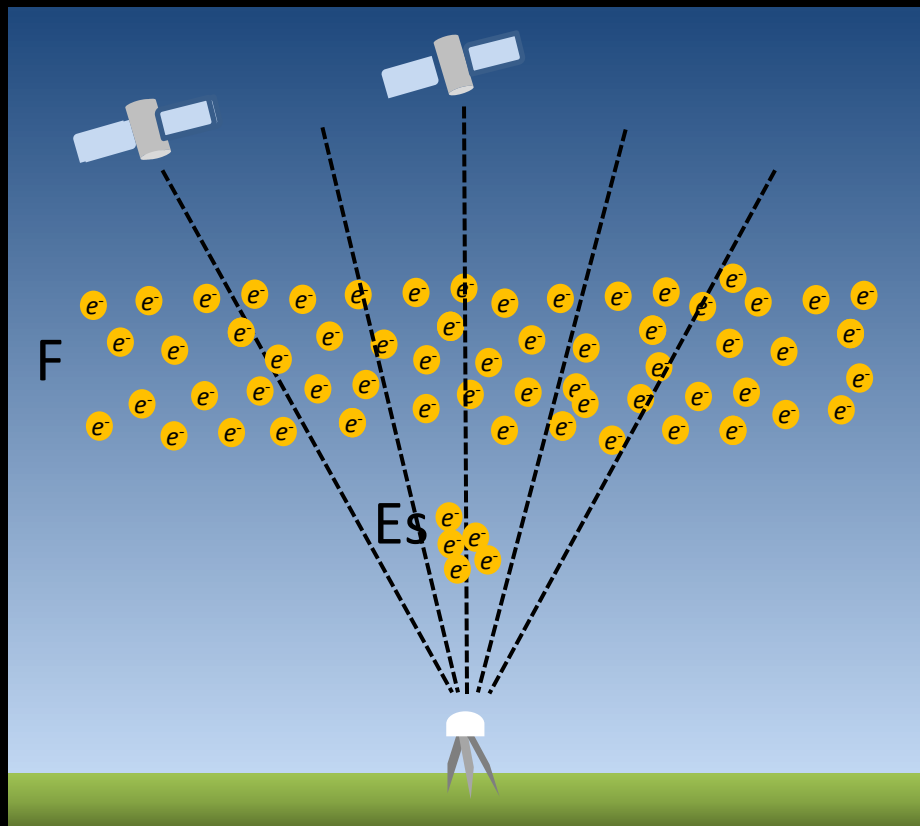


衛星の動き

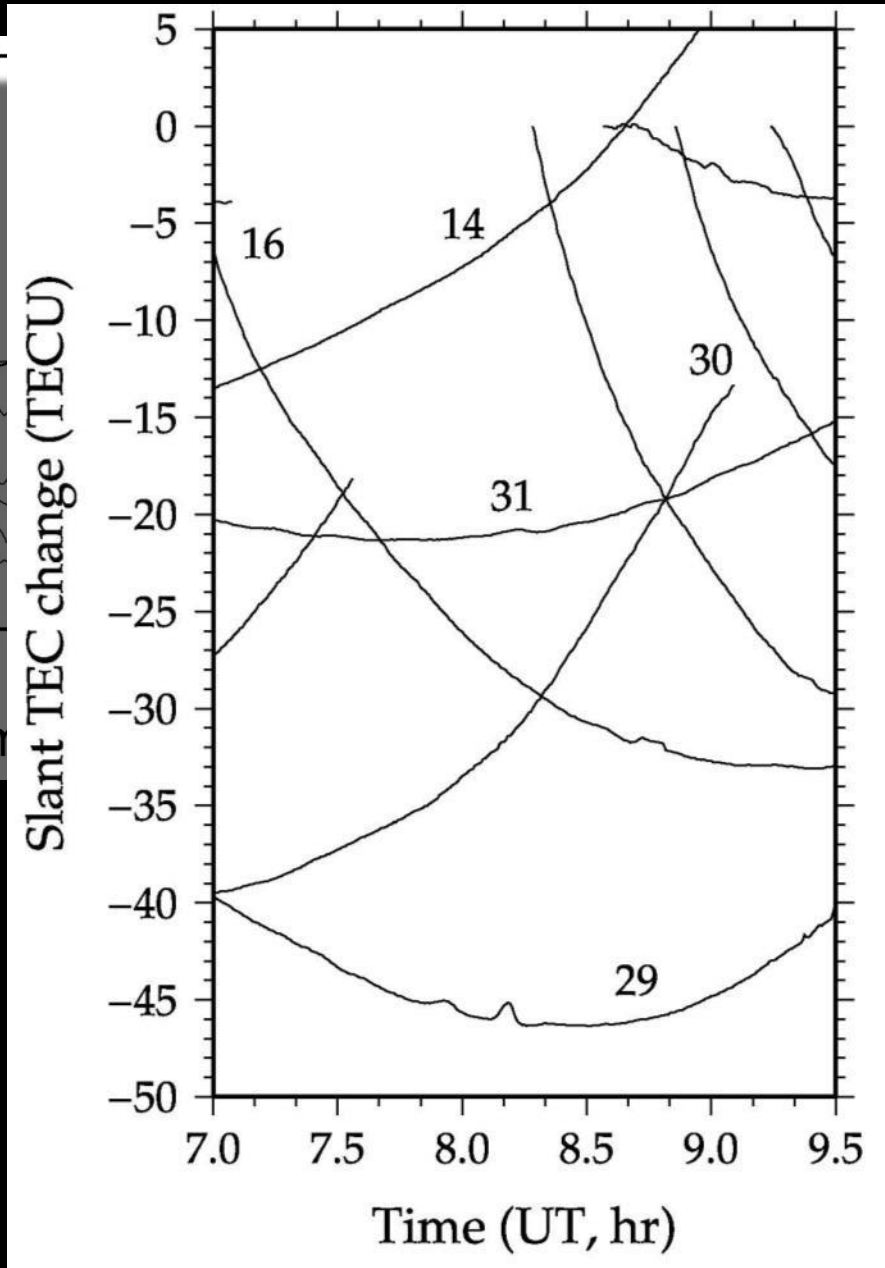
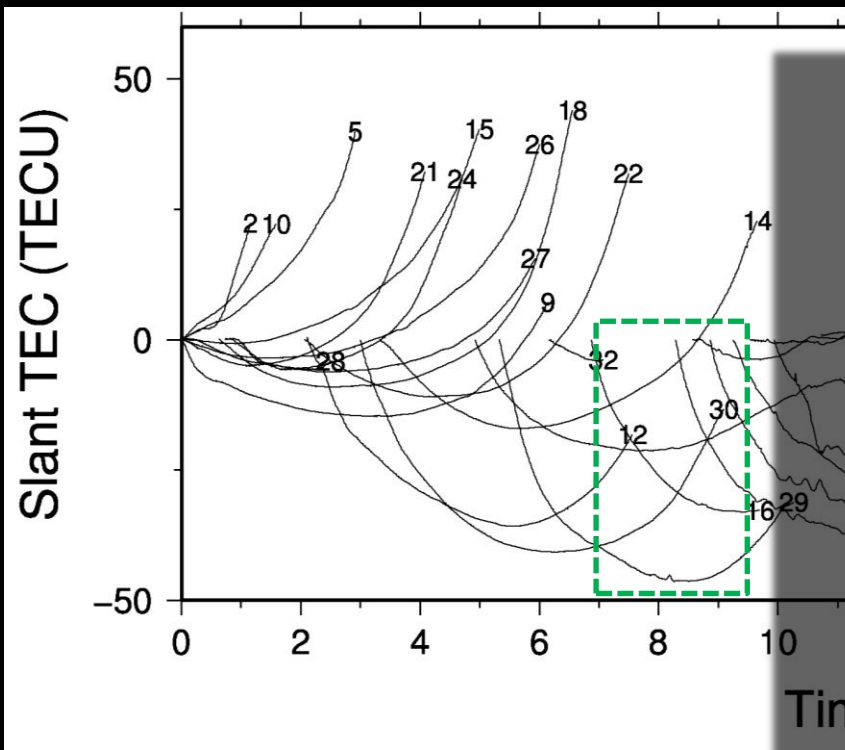


TEC時間変化 U字

## 計測原理 (2)

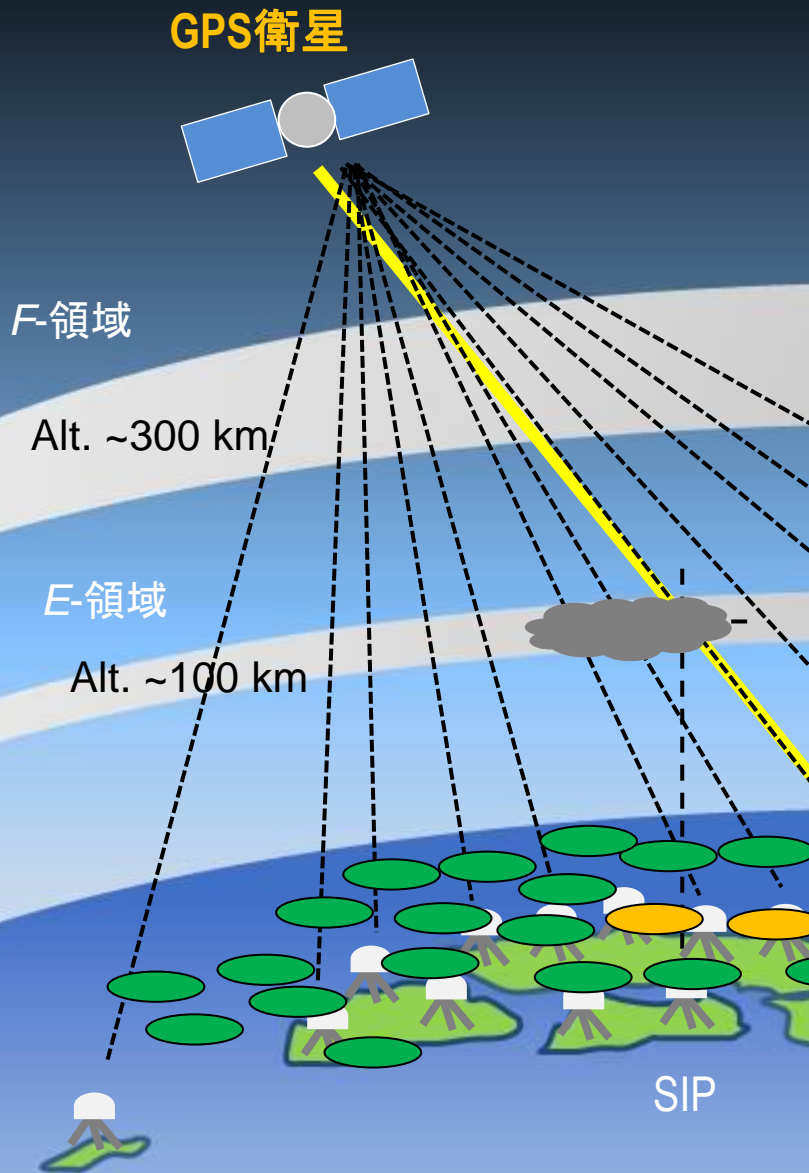


視線がEsを貫くとき、TECが増える



実際の解析

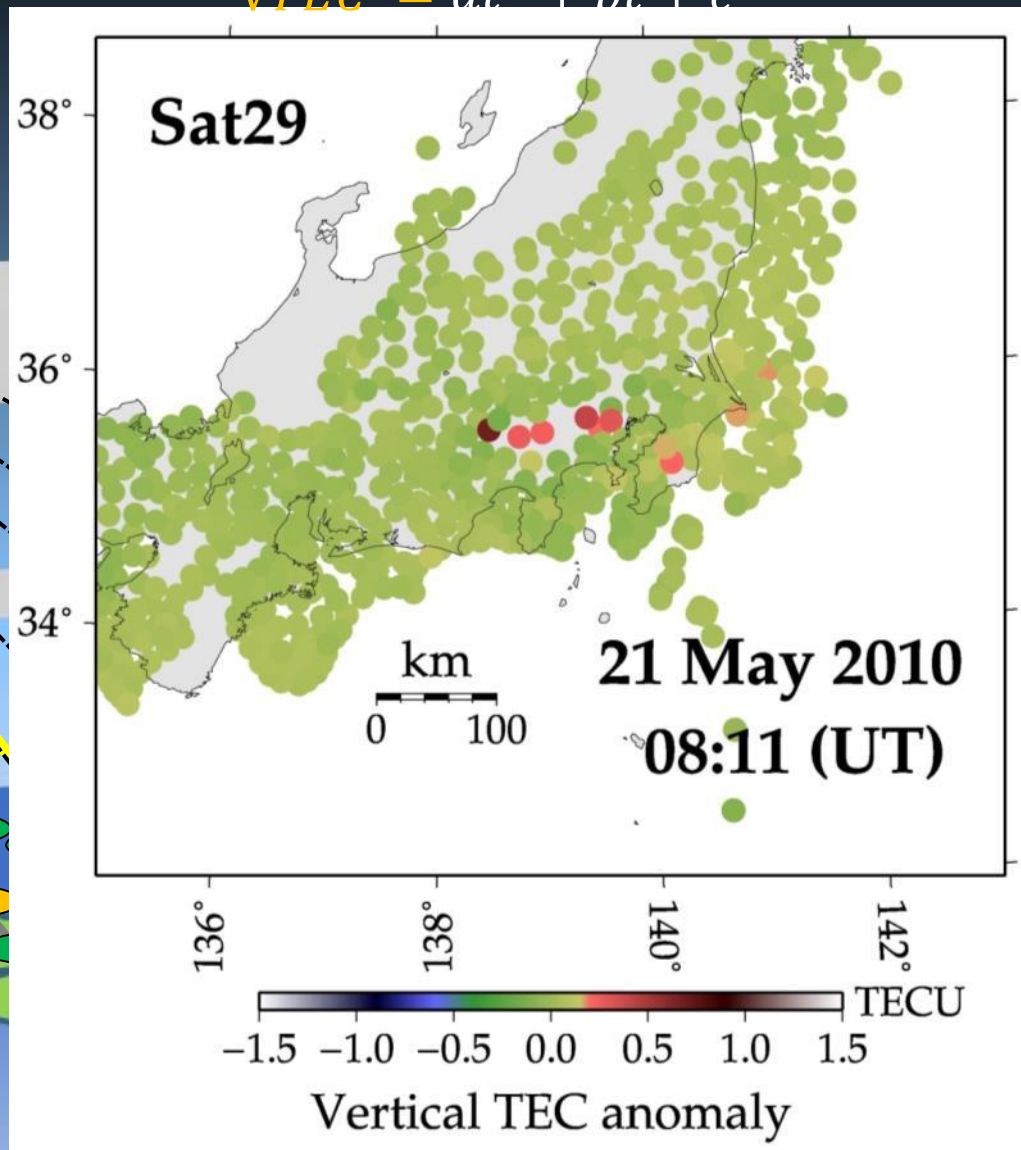
# TEC マッピング



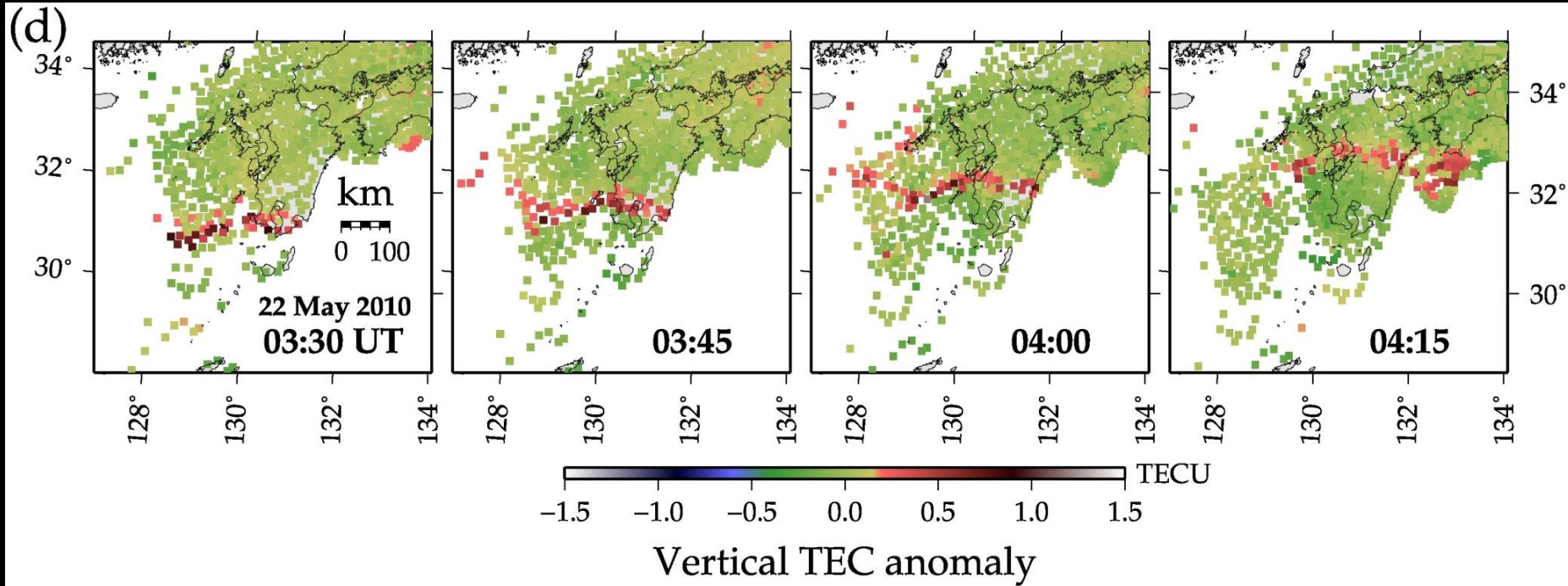
$$\text{Model slant TEC } (t, \zeta) = \frac{VTEC}{\cos \zeta} + d$$

$$VTEC = at^2 + bt + c$$

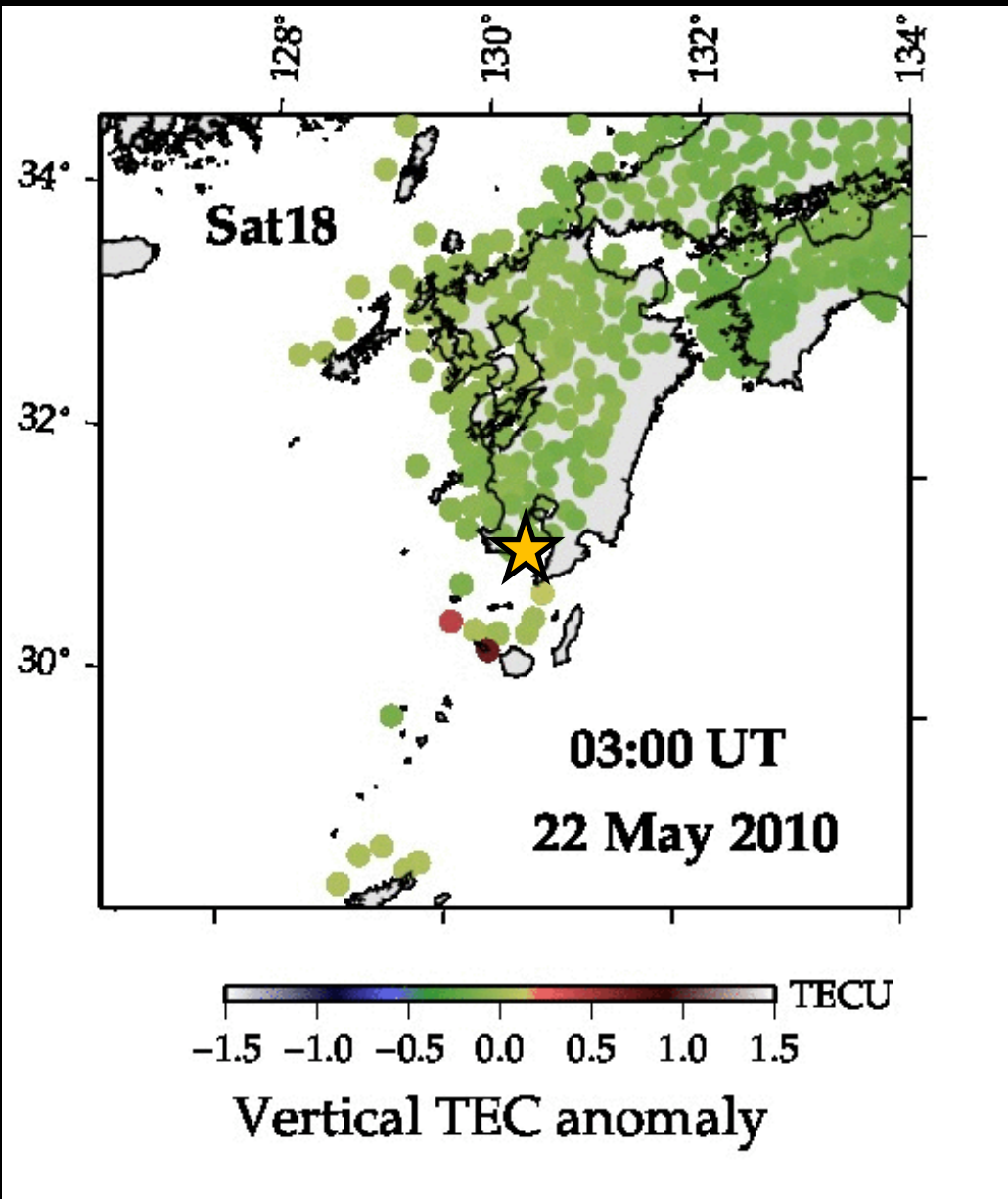
Esの水平面構造



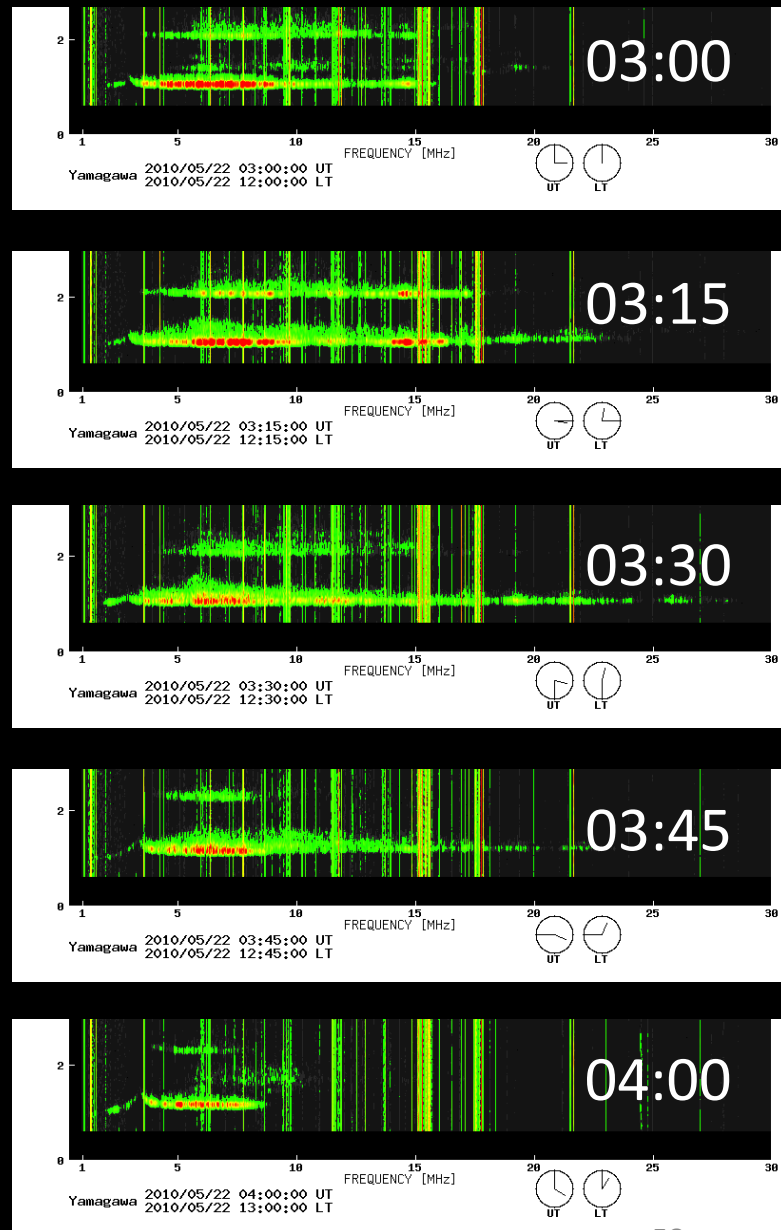
# スプラディックEの動き



# GPS - TEC



# イオノゾンデ (山川)



# 宇宙天気予報への期待

現状

宇宙天気の現況を提供  
→ ユーザー判断

## HF

1. 任意の送信地点と受信地点間において(ここが難しい)1~2時間後の電波伝搬予測ができると便利  
特に需要が大きい(予報が困難なもの)
  - ・極域パス
  - ・ロングパス
2. デリンジャー現象、磁気嵐はいつ回復するかが知りたい

## VHF

3. Esの発生アラート(NICTにより国内4点で運用中)

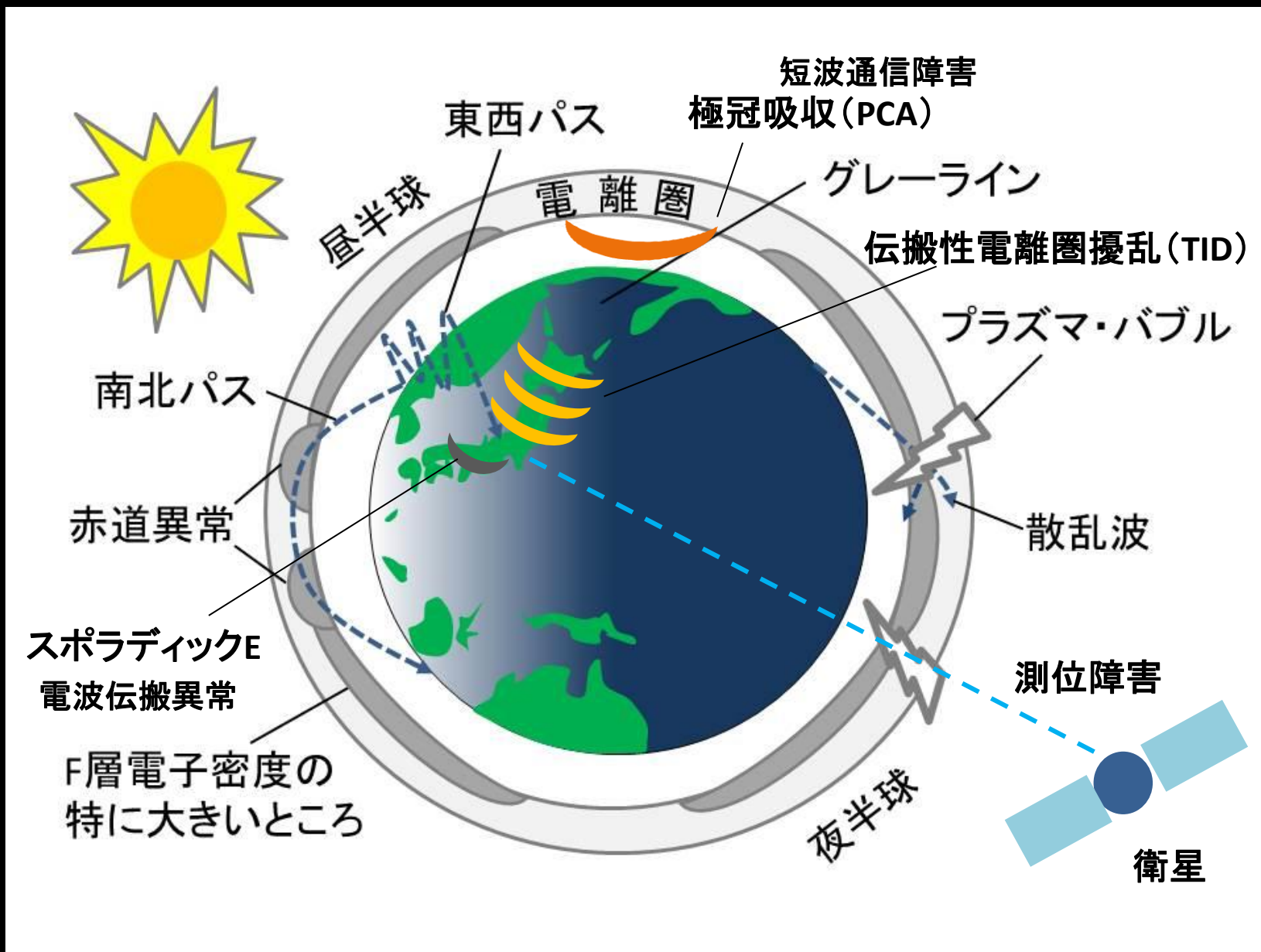
+地図上でEsの形状や移動をリアルタイム提供  
→ 異常伝搬範囲の特定と予測に効果的  
(水平の分解能は50 kmを割れば実用的)

## SHF

4. GNSS測位誤差(Es・バブル・TID)

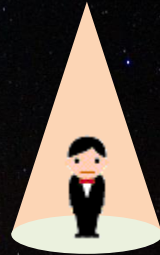
予報  
への  
期待

# From Space Weather to Ionospheric Weather



**Now Q &A**

**Ionospheric Radio Propagation**



**END**

Ver. 3.0  
as of 3 Aug. 2017