

通信・放送分野における 宇宙天気の影響

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）

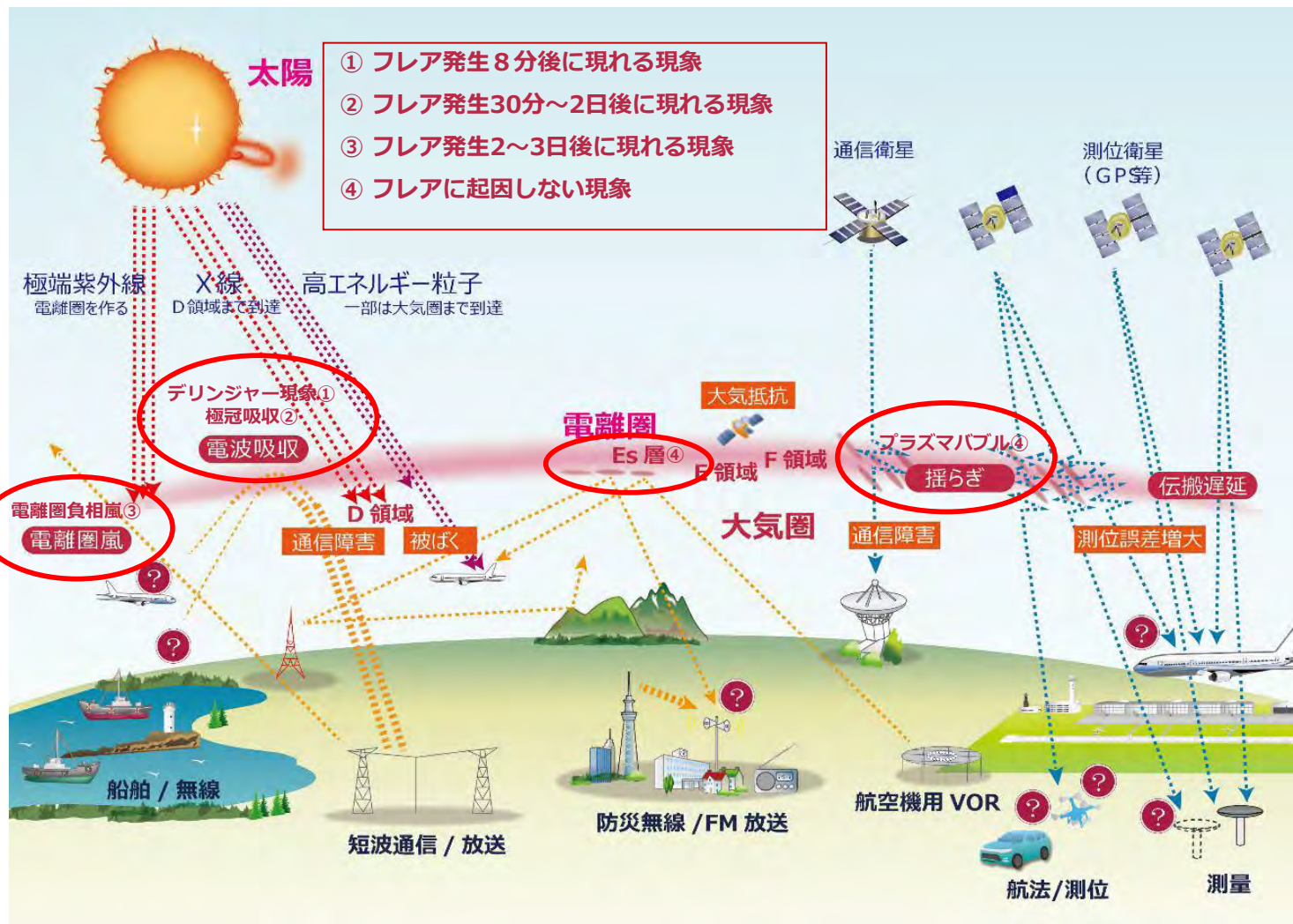
電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター

宇宙環境研究室長

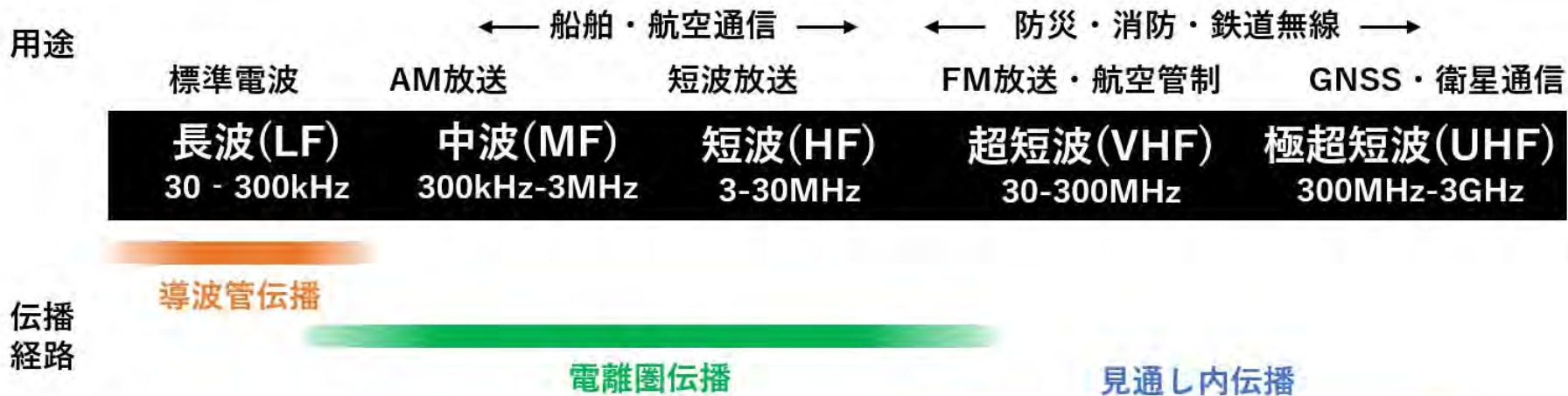
津川 卓也

通信・放送に影響を与える電離圏現象

- 大気の一部が電離した電離圏は、電波の反射・吸収・遅延を生じさせる。
- 電離圏は下層大気の影響も受けて変動するため、太陽活動に起因しない現象も発生する。



通信・放送に障害を起こし得る電離圏現象



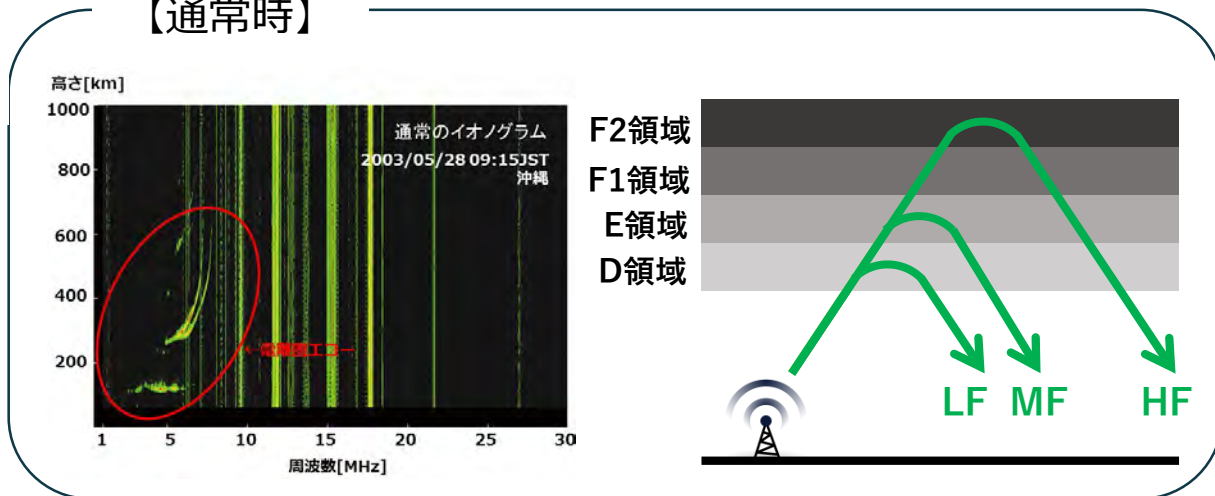
分野	影響と被害	障害を起こし得る電離圏現象
通信・放送	短波 (HF) に対する障害	デリンジャー現象 極冠吸収 電離圏負相嵐 プラズマバブル
	超短波 (VHF) に対する障害	プラズマバブル スポラディックE層
	極超短波 (UHF) に対する障害	プラズマバブル

通信・放送の障害: デリンジャー現象

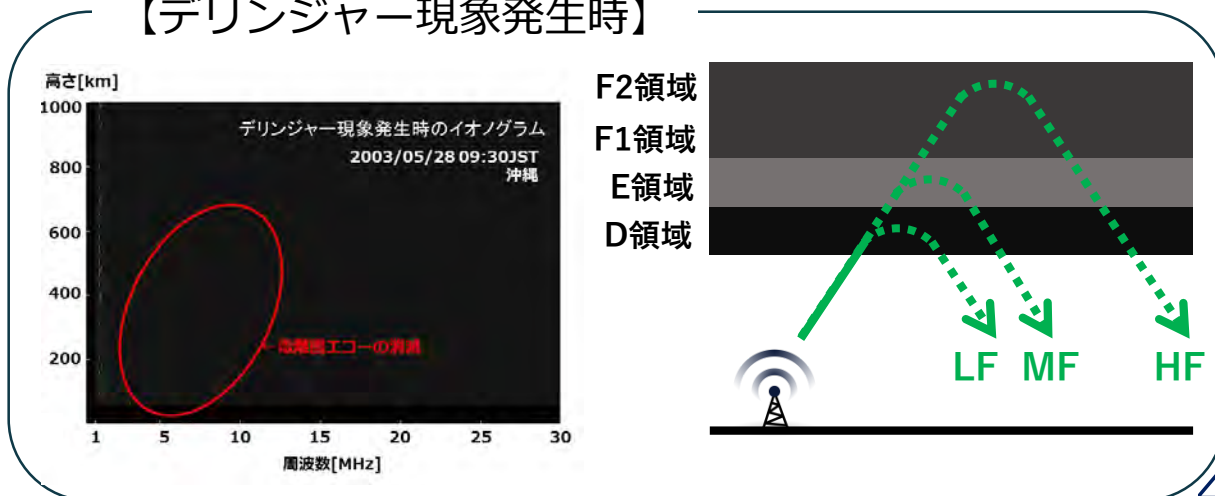
太陽フレア起源のX線の急激な増大により電離圏D領域の電子密度が急増し、D領域で電波が吸収される現象。昼側領域のHF帯通信・放送の障害につながる。

- 通常は電離圏F領域で反射し見通し範囲外の受信地に届くHF帯電波が受信できず、通信障害が発生。
- 昼側領域のみで発生し、太陽天頂角が小さいほど影響が大きい。そのため、正午に近く、より低緯度の地域で影響が大きい。
- 現象の発生継続時間は、フレアの継続時間に依存し、数分から数時間程度。

【通常時】



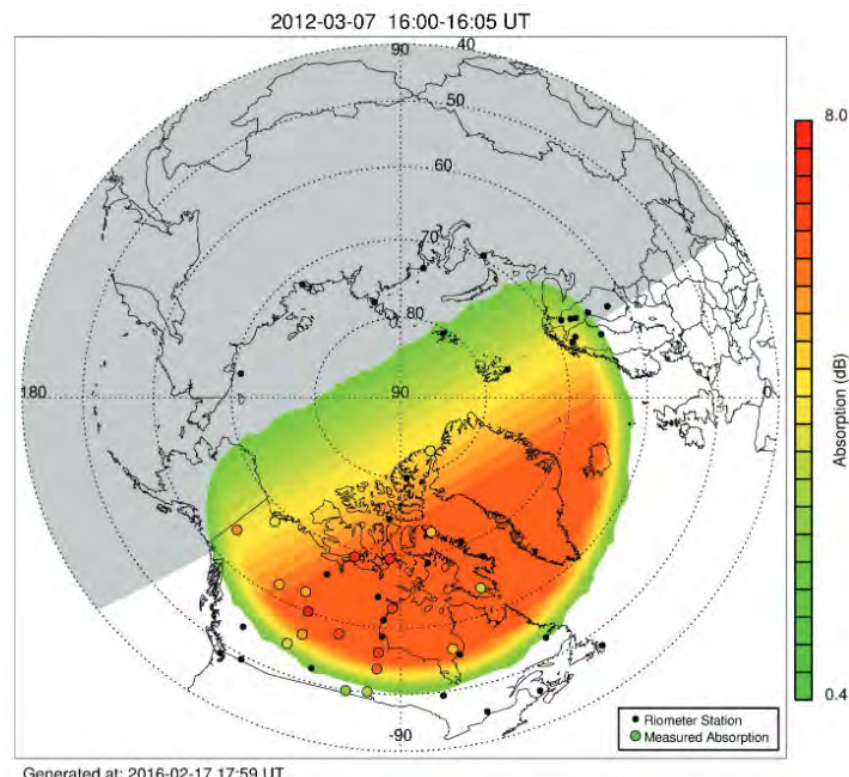
【デリンジャー現象発生時】



通信・放送の障害：極冠吸収

太陽フレアに伴って放出される太陽高エネルギー粒子（SEP）によって、極冠域の電離圏D領域の電離が急激に進むことで電波の吸収が増大する現象。極冠域HF帯通信・放送の障害につながる。

- 通常電離圏F領域で反射し見通し範囲外の受信地に届くHF帯電波が受信できず、通信障害が発生。
- 太陽フレアに伴うD領域の異常電離による電波の吸収という点ではデリンジャー現象と共通するが、極冠吸収は極冠域において昼夜を問わず発生する。
- 極航路を飛行する航空機との航空無線による通信などに影響が出る。



モデルによる電離圏D流域の極冠吸収量

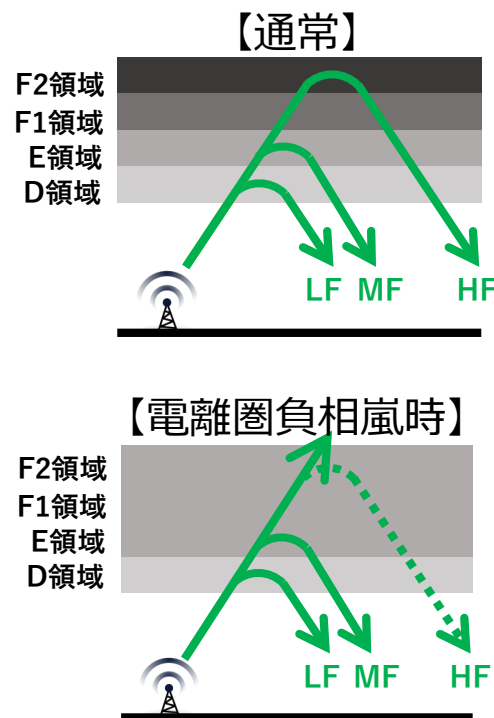
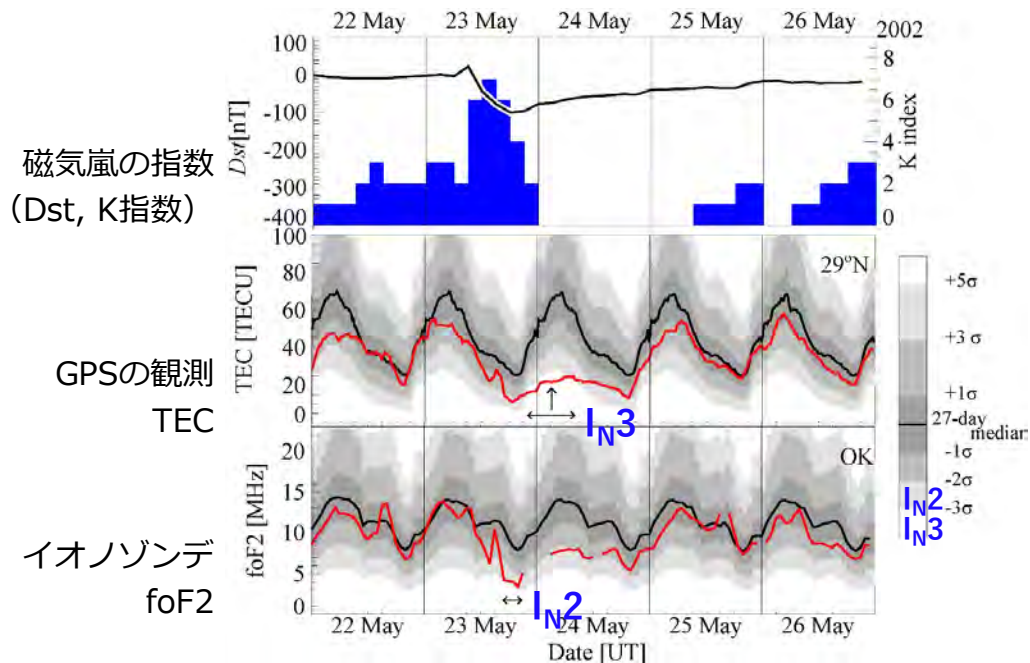
[Fiori, R. A. D., 2020. Detailed explanation of modelling absorption due to polar cap absorption and shortwave fadeout; Geological Survey of Canada, Open File 8704, 25 p. <https://doi.org/10.4095/321793>]

通信・放送の障害：電離圏負相嵐

主に磁気嵐が原因で、極域の超高層大気の加熱に伴う大気組成の変化が全球的に広がり、化学反応を通して電離圏プラズマ密度が現象する現象。HF帯通信・放送の障害につながる。

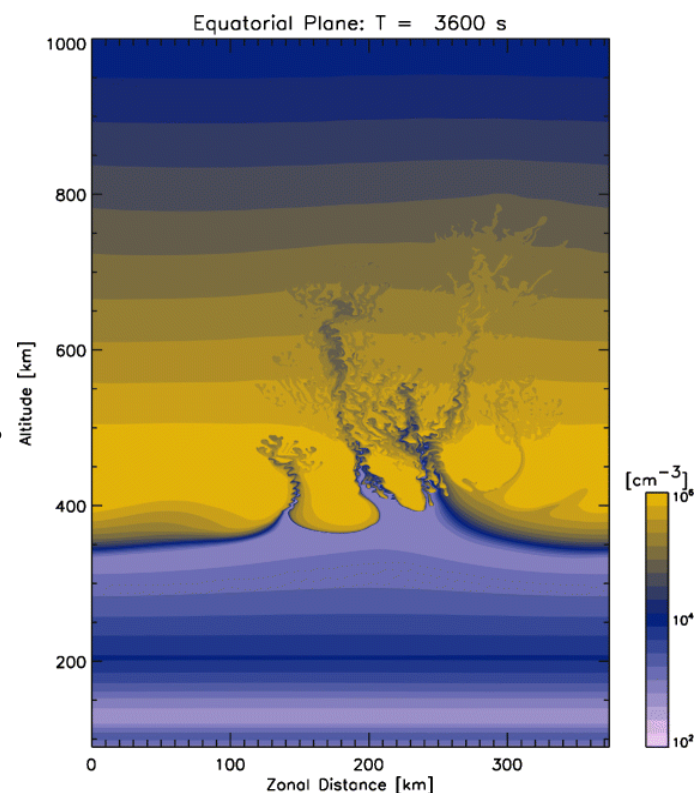
- 通常はF領域で反射されるHF帯の電波が、反射されずに電離圏を通過してしまうため、見通し外のHF通信・放送の受信が困難になる。
- 電離圏負相嵐は磁気嵐を起因としてその発生から数時間～数日継続する。

電離圏負相嵐の例 (2002年5月)



磁気赤道を中心とした低緯度の電離圏において、日没後局所的に電子密度が低い領域が「泡」のように発生し、磁力線に沿って南北方向に広がりながら東向きに移動する現象。中低緯度域HF～UHF帯通信・放送の障害につながる。

- 太陽活動や地磁気が活発な時には、中緯度域まで発達することもある。
- プラズマバブルの内部や周辺では、電子密度の空間的な変化が大きく、HF～UHF帯の電波伝搬に影響がある。
- HF帯への影響：バブル下部構造による電波伝搬方向の変化等があるが、通信・放送としての影響は小さい。
- VHF帯への影響：プラズマ不規則構造による電波の散乱やバブル構造に沿った異常伝搬により、一部が見通外に伝搬するが、通信・放送としての影響は小さい。
- UHF帯への影響：プラズマ不規則構造により、信号受信強度の短周期の変動が発生し、**地上－衛星間の通信品質の劣化等につながる。**

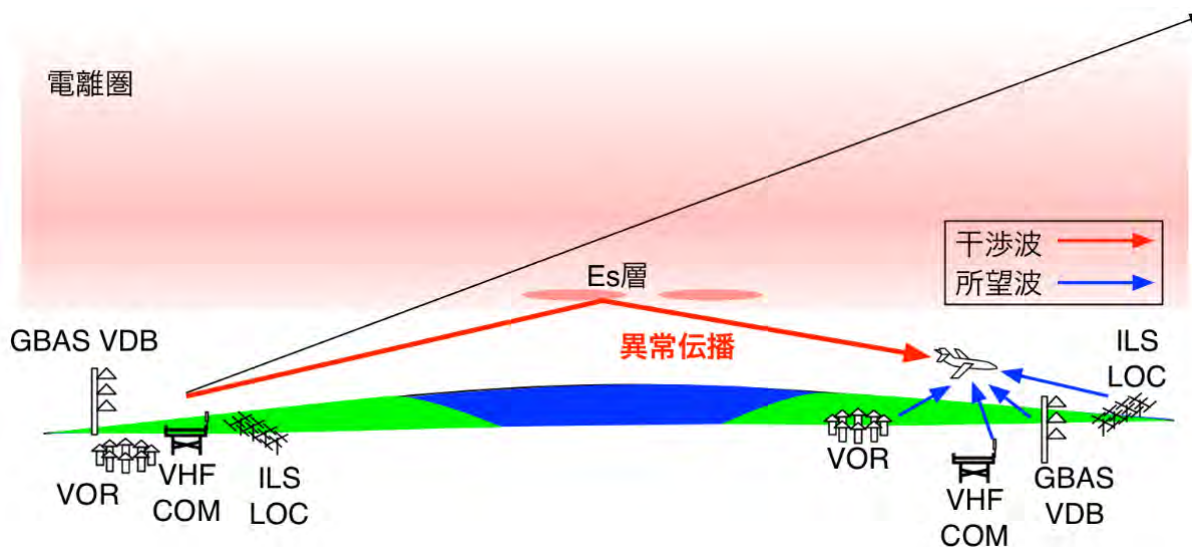


モデルによるプラズマバブルの構造
[Yokoyama, Progress in Earth and Planetary Science, 2017]

通信・放送の障害: スポラディックE層

高度100km程度に突発的に且つ局所的に発生する電子密度の濃い層。VHF帯の通信・放送の障害につながる。

- 太陽や地磁気の活動に依らず発生し、日本では夏季に頻発する傾向がある。
- 通常は電離圏で反射されないVHF帯の電波でも、入射角が大きくなるとEs層によって反射され異常伝搬し、見通し外の遠くの通信や放送との混信の原因となる。



スポラディックE層に伴う航空用VHF帯電波の長距離異常伝播によって起こりうる通信の干渉の模式図

[細川敬祐、他、電子航法研究所2017年（第17回）研究発表会、2017]

朝日新聞

夕刊 [東京]

2018/08/28

DIGITAL

昨年9月に太陽の表面で起きた大規模な爆発「太陽フレア」の影響で、同時期に超大型ハリケーンの被害を受けたカリブ海周辺で大規模な電波障害が生じ、救援活動に支障が出たことがわかった。米海洋大気局（NOAA）など研究チームが発表した。

5段階で最も強い勢力のハリケーン「イルマ」は昨年9月、カリブ海から米フロリダ半島に上陸して47人が死亡した。アンティグア・バーブーダやバール諸島を直撃した6日、太陽表面では2度の太陽フレアが起きた。規模は通常の1千倍で最大級だった。

この影響で発生した強力なX線が、

太陽フレア、ハリケーン災害救援に支障

昨年9月 X線で電波障害

地球を覆う電離層を乱し、アマチュア無線や船舶・航空通信に使われる波長の短い電波（短波）を吸収した。カリブ諸国の緊急通信を支援していたアマチュア無線家によると、同日午前から午後の早い時間にかけて通信ができなくなったという。NOAAは6日には、短波通信が最大8時間使えなかったとしている。

研究チームは、こうした電波障害による救援活動への影響の詳細は不明としつつ、「地上と宇宙の天気が混じり合い、影響を増大させた」と指摘。宇宙天気予報の改善や、認識の向上が必要としている。（ワシントン＝香取啓介）

- 2017年9月6日X9.3など10日までに連続的にフレア発生。昼側領域で強いデリンジャー現象が複数回発生。
- 当時カリブ海では超大型ハリケーンのイルマ等の複数のハリケーンが連続して発生し、カリブ海諸国に甚大の被害を発生させていた。デリンジャー現象の影響により、現地で緊急災害対応を行っていた米国連邦緊急事態管理庁（FEMA）等の関係者の短波通信の全面的な途絶が発生した（9/6午前中～午後、9/10夕方3時間程度）
- 同時期、ブラジルとフランス領ギニアの沿岸を飛行していたフランスの民間航空機においては、約90分間にわたり航空無線の連絡が途絶した。航空機は管制官-パイロット間データ通信装置（CPDLC）を搭載していない機であったため混乱を引き起こした。

Redmon, R. J., Seaton, D.B., Steenburgh, R., He, J., & Rodriguez, J. V. (2018). September 2017's geoeffective space weather and impacts to Caribbean radio communications during hurricane response. Space Weather, 16. <https://doi.org/10.1029/2018SW001897>.

極冠吸収の航空運用への影響事例

SCIENCE NEWS 2012年1月25日 / 5:47 午前 / 10年前更新

Delta diverts polar flights due to solar storm

ライター編集

2分で読む



A Delta Air Lines jet takes off past a Northwest Airline jets parked at gates at the Minneapolis St. Paul International Airport in Minneapolis, Minnesota October 30, 2008. REUTERS/Eric Miller

(Reuters) - Delta Air Lines was diverting some flights on polar routes between Detroit and Asia to avoid disruptions to aircraft communications by a strong solar radiation storm, the airline said on Tuesday.

[Reuters 2012年1月25日ウェブ記事より]
<https://jp.reuters.com/article/us-delta/delta-diverts-polar-flights-due-to-solar-storm-idUKTRE80N28I20120124>

- 2012年1月23～28日 M8、X1クラスの太陽フレアが発生し、**高エネルギー粒子の増加が観測された。**
- デルタ航空、エアーカナダ、カンタス航空の**極域航路便がそれぞれ低緯度の航路に変更。**

その他の事例の一部

発生日・フレア規模	影響事象概要
2001/4/3 X17.1	4/3 6:30UT頃から約2時間にわたり、成田空港と飛行中の国際線の航空機との通信状況が数分ずつ、断続的に悪くなった
2003/10/23-11/6 X1, X17, X28	極航路の航空機でHF/VHF通信の悪化により航路変更 (10/24)
2005/1/15-19 X2	United Airlines の 26 の便で PCA による通信障害リスク回避のため、航路変更
2012/3/7-13 X5, M7	デルタ航空が極域航路便で航路を低緯度に変更 (3/8-9)

「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」より



- 2002年3月アフガニスタンにおける米軍のアルカイダ掃討作戦「Anaconda作戦」中、**UHF衛星通信（SATCOM）の障害が発生し、米軍側の人的被害につながった。**
- この衛星通信障害は**プラズマバブルが原因であった可能性が指摘されている。**

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° 20'34"N 69° 12'49"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.**

[Science 2014/9/23のウェブ記事より]
<https://www.science.org/content/article/space-bubbles-may-have-led-deadly-battle-afghanistan>

電離圏現象の発生頻度と規模

電離圏現象	規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
デリンジャー現象	吸収量（長距離）[dB] ¹⁾	71	83	93	100
	継続時間[h] ²⁾	0.63-1.6	1.8-3.6	4.0-6.8	7.4-11.9
プラズマバブル	継続時間[h] ³⁾	4-5	6		

¹⁾ 長距離短波回線に基づく（実効太陽天頂角0度 6.6MHzの場合）

²⁾ イオノゾンデ観測に基づく（1-30MHz' B'および $f_{min} \geq 2.5$ MHzの場合）

³⁾ 沖縄におけるGPS-TEC観測に基づく（1997-2018年統計解析）

電離圏現象	規模を示すパラメータ	日常～ 複数回/年	1回/1年	1回/ 10年	1回/ 100年	1回/ 1000年
極冠吸収	磁気緯度（日中）@6.6MHz 10dB ¹⁾	65° (60°)	57° (55°)	53° (52°)	51°	50°
	磁気緯度（夜間）@6.6MHz 10dB ¹⁾	65° (60°)	60° (58°)	56° (55°)	53°	53°
	最短継続時間 [h] ²⁾	22	46	71	83	89

¹⁾ 極冠吸収が広がる緯度。

²⁾ SEPイベントで、10 MeV以上の粒子フラックスが >10 pfuとなる継続時間。

電離圏現象	規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年	1回/100年
スプラディックE層	1,000km伝播可能な周波数の上限 [MHz]	100	110	$>130^{1)}$
	2,000km伝播可能な周波数の上限 [MHz]	130	$>180^{1)}$	$>180^{1)}$
	foEs >13.3 MHzにおける継続時間 ²⁾ [h]	~3	~5	
	foEs >18 MHzにおける継続時間 ³⁾ [h]	1-2	~3	

¹⁾ 不等号はイオノゾンデで観測可能な臨界周波数が30MHzまでであることによる。

²⁾ 80MHzの電波が水平距離2000km以上伝播する目安

³⁾ 80MHzの電波が水平距離1000km以上伝播する目安

【航空運用】 ICAO宇宙天気スケールの発生頻度（PCAについては未解決）

航空運用の障害	宇宙天気現象（規模を示すパラメータ）	Moderate	Severe
HF	Auroral Absorption (Kp)	8 (1回/10年)	9 (1回/100年)
	PCA (dB from 30MHz Riometer data)	2	5
	Solar X-rays (0.1 -0.8 nm)(W-m ²)	X1 (複数回/年)	X10 (1回/10年)
	Post-Storm Depression (MUF)	30% (複数回/年)	50% (1回/10年)

- 通信・放送分野に影響を与える宇宙天気現象は、主に電離圏擾乱であり、影響の規模は利用システムにより異なる。
- 影響を与える電離圏擾乱現象は太陽や地磁気の活動に起因しないものもある。

PSTEPによりまとめられた電離圏擾乱現象の発生頻度・規模に着目した影響マトリクス

分野	影響と被害	障害を起し得る 宇宙天気現象	発生頻度と影響				
			日常～ 複数回/年	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
通信・放送 ■	短波 (HF) 通信・放送 の障害	電離圏嵐 (負相嵐)				*	*
		デリンジャー現象				*	*
		極冠吸収 (PCA)				*	*
		プラズマバブル				*	*
	超短波 (VHF) 通信・ 放送の障害	スポラディックE層	△	△	△	△	△
		プラズマバブル				*	*
航空運用	通信障害 (地上航法援助用放送 を含む)	電離圏嵐 (負相嵐)				*	*
		デリンジャー現象				*	*
		極冠吸収 (PCA)				*	*
		プラズマバブル			*	*	*
		スポラディックE層			*	*	*

評価できず
 影響が無視できる範囲
 バックアップの準備等の適切な対応を要する範囲
 運用の継続が困難になる範囲

* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの