



## 宇宙天気予報に必要な地上受動観測の周波数保護について

国立研究開発法人情報通信研究機構

いしい まもる  
石井 守

くぼ ゆうき  
久保 勇樹

しおた だいこう  
塩田 大幸

つかわ たくや  
津川 卓也

名古屋大学宇宙地球環境研究所

いわい かずまさ  
岩井 一正

国立極地研究所

たなか よしまさ  
田中 良昌

一般社団法人電波産業会

よこやま たかひろ  
横山 隆裕

### 1. はじめに

ITU-R WRC-19において、「現状の無線通信業務に追加の制約を設けることなく、無線規制における適切な認識と保護を設けることを視野に入れ、宇宙天気センサの技術的及び運用上の特性、周波数要件及び適切な無線業務の指定に関する研究結果を検討する」との決議がなされた（決議657（WRC19改））。これを受けて、宇宙天気センサに関するWRC-23議題9.1aが設定され、同WRCに向けての検討が行われている。

宇宙天気観測に用いられるセンサのうち受動観測を行うものは、その対象が太陽電波や銀河電波など微弱なものが多く、周辺の人工雑音等に大きく影響を受ける。このため、受動観測装置については特段の注意を払う必要がある。

本稿では、宇宙天気についての概要を述べた後、受動観測装置について紹介する。その後、我が国がWRC-23に向けて行う議題9.1aへの対応について紹介する。

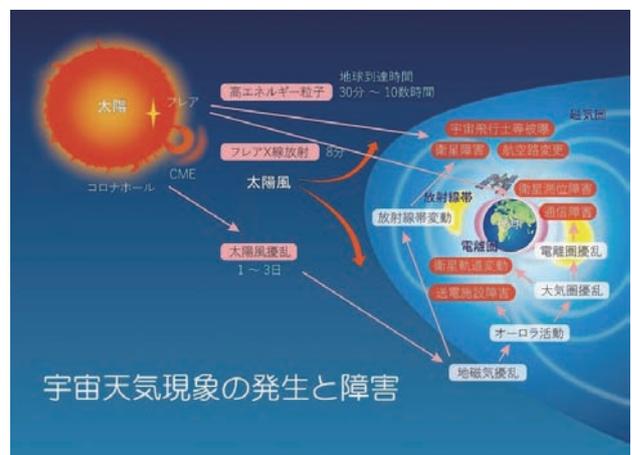
### 2. 宇宙天気とは

近年、我々の生活は通信衛星、放送衛星、気象衛星、GPS衛星など宇宙空間を利用した社会インフラシステムに依存するようになってきている。電離圏による反射を利用した長距離無線通信やGPSの精密測位においても、宇宙環境の影響を電離圏のじょう乱を通して受ける。また、国際宇宙ステーションや民間会社による宇宙旅行計画など、人類が宇宙空間を訪れる機会も徐々に増えつつある。

図1は、太陽から到来する現象と地球周辺の宇宙空間の構造をまとめるとともに、そのじょう乱が社会影響に至る過程を示している。太陽からは「太陽風」という常に吹き出されるガス（プラズマ）流があり、地球に到来する太陽風は絶えず変化している。さらに、太陽の大気「コロナ」では、時折「太陽フレア」と呼ばれる大規模な爆発現象が発生し、X線・紫外線をはじめとした広範囲の波長帯の「電磁波」が増加するとともに、太陽放射線（宇宙線）とも呼ばれる高エネルギー粒子「太陽高エネルギー粒子（SEP）」

が放出される。さらにはコロナガス（プラズマ）が大規模に放出される「コロナ質量放出（CME）」現象が発生し、惑星間空間を流れる太陽風の中を膨張しながら太陽から外に向かって伝播する。このように電磁波・放射線・プラズマ流（太陽風・CME）の3種類の現象として太陽からの影響が地球に到来する。一方で、地球では通常は地球の磁場や大気がこれらの影響に対するバリアの役割を果たしている。地球の磁場によって太陽風プラズマの侵入が妨げられている空間を「磁気圏」という。また、高層大気による吸収によってX線・紫外線や高エネルギー粒子の地表への到達を防いでいる。紫外線の吸収などの効果で一部の粒子が電離された状態で存在する層があり、これを「電離圏（電離層）」という。磁気圏には「放射線帯」という、高エネルギーの粒子（静止軌道付近の組成は主に電子）が地球の磁場に捉われて存在する領域がある。

太陽から地球に到来するじょう乱の強度や太陽風中の磁場の向きなど諸条件によっては地磁気バリア機能が低下し、地球周辺の宇宙環境にじょう乱が引き起こされる。例えば、ある一定の値よりも高いエネルギーをもつ太陽放射線粒子は、磁気圏に侵入し、宇宙飛行士の被ばく、衛星の半導体機器の誤動作や太陽電池劣化を引き起こす。放



■ 図1. 宇宙環境じょう乱の発生と障害

射線帯の高エネルギー電子が増加すると静止衛星の帯放電頻度が上昇し、衛星の不具合につながるリスクが上昇する。さらに、影響は宇宙空間のみにとどまらず、じょう乱は磁気圏から電離圏へ伝わり、航空機の運航や通信・放送インフラなどにも影響する。極めて強い地磁気嵐に伴う誘導電流は地上の送電設備に障害を与えることがある。「宇宙天気」は太陽から地球に至る電磁環境を含む状況を指す。この中には、人類の健康や社会インフラに影響を与える宇宙放射線や地磁気嵐などの宇宙環境変動を含む。

### 3. 宇宙天気予報に必要な主な地上受動観測装置

前章に示したような航空機や送電網への影響が発生する頻度はまれではあるが、一度起こると社会に深刻な経済的インパクトをもたらす。また、通信や測位システムなど電波利用に対しては、比較的頻繁に宇宙天気の影響が現れることが知られている。このため、宇宙天気じょう乱の発生を早期に見つけ、必要な対策を講じることが必要となる。

以下に示すセンサは、宇宙天気じょう乱の発生を検出するために、宇宙天気予報業務等で広く利用されているものである。

#### 3.1 太陽電波観測装置

太陽は非常に広帯域の電波を常時放出しており、太陽活動に関する様々な指標に利用されている。特に、波長10.7cm（周波数2.8GHz）の電波強度は、太陽黒点数と良い相関を持つため、太陽活動の指標として古くから使われている。このような単一周波数を計測する装置を太陽フラックスモニタと呼ぶ。

太陽フラックスモニタの干渉条件は、該当する周波数における最小太陽フラックスで決められる。ITU-R報告RS.2456<sup>[1]</sup>では、太陽フラックスモニタの干渉条件を以下の式で示している。ITU-Rでは現在、WRC-23に向けてこの干渉条件を含めRS.2456について改定作業を行っている。

$$I_{\max} \text{ (pfd)} = \text{SolarRadioFluxmin} \times \text{Bandwidth} \times \text{Precision}$$

$I_{\max} \text{ (pfd)}$  : 最大許容干渉強度フラックス密度 (W/m<sup>2</sup>)

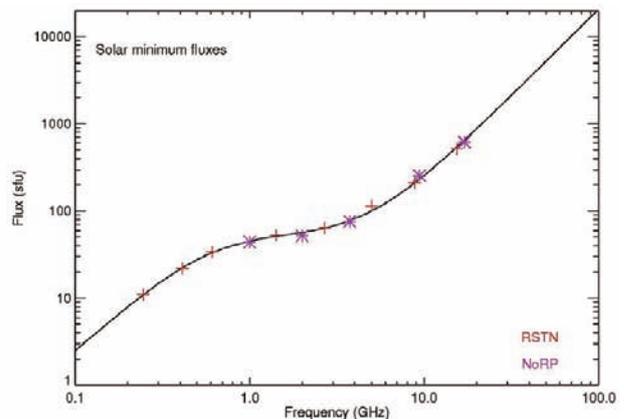
SolarRadioFluxmin : 太陽活動極小時の典型的な太陽電波フラックス

Bandwidth : 受信機の帯域 (Hz)

Precision : 小数点3桁の計測制度<sup>注1</sup>

注1: ITU-Rでは現在、桁数を減らす方向で見直し中である。

ITU-R報告RS.2456の表7では、世界で運用されている様々な太陽フラックスモニタの特性を示し、宇宙天気予報に関する情報を提供している。太陽活動極小時の典型的な太陽電波フラックスの最小値を図2に示す。



■図2. 太陽活動極小時の典型的な太陽電波フラックスの最小値 (出典:[1])

図2で示された、太陽電波フラックスモニタで使われる各周波数での値を表1に示す。

■表1. 太陽電波フラックスモニタで使われる周波数での最小値

周波数 (MHz)	最小太陽電波フラックス (SFU1 <sup>注2</sup> )	最小太陽電波フラックス (W/ (Hz m <sup>2</sup> ))
140	4.5	4.5 × 10 <sup>-22</sup>
150	5.0	5.0 × 10 <sup>-22</sup>
236	10.1	10.1 × 10 <sup>-22</sup>
245	11	11 × 10 <sup>-22</sup>
327	18	18 × 10 <sup>-22</sup>
410	21	21 × 10 <sup>-22</sup>
432	22	22 × 10 <sup>-22</sup>
610	32	32 × 10 <sup>-22</sup>
1 000	43	43 × 10 <sup>-22</sup>
1 415	50	50 × 10 <sup>-22</sup>
1 665	51	51 × 10 <sup>-22</sup>
2 000	58	58 × 10 <sup>-22</sup>
2 695	61	61 × 10 <sup>-22</sup>
2 800	62	62 × 10 <sup>-22</sup>
3 300	70	70 × 10 <sup>-22</sup>
3 760	74	74 × 10 <sup>-22</sup>
4 541	90	90 × 10 <sup>-22</sup>
4 995	98	98 × 10 <sup>-22</sup>
8 325	190	190 × 10 <sup>-22</sup>
8 800	205	205 × 10 <sup>-22</sup>
9 084	220	220 × 10 <sup>-22</sup>
10 650	505	505 × 10 <sup>-22</sup>
15 400	600	600 × 10 <sup>-22</sup>

注2: 1 SFU=10<sup>-22</sup> (W/ (Hz m<sup>2</sup>))



このシステムの干渉条件はアンテナの有効径によるため、システムごとに値が異なる。表2に上述の式で算定された各センサの干渉基準を示す。

太陽分光計 (Solar Spectrometer) は、太陽フラックスモニタに比べると非常に帯域の広い電波を計測し、太陽フ

レアに伴う爆発的な電波放出 (太陽電波バースト) を計測する。鹿児島県指宿市に設置されている情報通信研究機構の太陽電波観測システムは、70MHzから9GHzの領域を昼間の間、継続的に計測している<sup>[2]</sup>。

太陽フレアに伴って発生する太陽電波バーストは、ダイナ

■表2. 太陽電波フラックスモニタの干渉基準

サイト名	緯度	経度	周波数 (MHz)	アンテナゲイン (dBi)	受信 BW (MHz)	有効面積 (m <sup>2</sup> )	干渉基準 <sup>注3</sup> (dBW)
ベントリクトン	49.3°N	199.6°W	1 400–1 427	35	[27]	11.56	-128.1
			1 660–1 670	35	[10]	8.85	-133.5
			2 750–2 850	37	[100]	4.75	-125.4
			3 250–3 350	37	[100]	3.40	-127.7
			4 990–5 000	28	[10]	0.181	-149.0
			8 275–8 375	37	[100]	0.524	-130.0
ナンカイ (NRH)	47.4°N	2.2°E	150	5	0.7	1.01	-164.5
			236	5	0.7	0.407	-165.4
			327	5	0.7	0.212	-165.7
			410	5	0.7	0.135	-167.0
			432	5	0.7	0.121	-167.3
リアマンス (SEON)	22.2°S	114.1°E	245	24.6	10	34.41	-134.2
			410	29	3.9	33.84	-135.6
サンヴィート (SEON)	40.6°N	17.8°E	610	32.5	6	34.23	-131.8
サガモアヒル (SEON)	42.4°N	70.8°W	1 415	28.8	27	2.71	-134.4
			2 695	34.4	100	2.74	-127.8
パレワ (SEON)	21.4°N	158.1°W	4 995	39.8	50	2.74	-128.7
			8 800	44.7	50	2.73	-125.5
			15 400	41	50	0.380	-129.4
フマン	45.9°N	4.0°E	1 400–1 427	31	27	4.60	-132.1
			1 660–1 670	33	10	5.18	-135.8
			2 750–2 850	37	100	4.75	-125.4
			4 990–5 000	42	10	4.56	-133.5
			8 275–8 375	[未定]	100	[未定]	[未定]
			10 700	[未定]	100	[未定]	[未定]
イチョン	37.1°N	127.5°E	2 800	31.4	[未定]	1.26	[未定]
野辺山	36.4°N	138.2°E	1 000	29	10	5.69	-136.1
			2 000	31	10	2.25	-138.8
			3 760	33	10	1.02	-141.2
			9 400	40	20	0.810	-134.5
雲南	25.0°N	102.8°E	2 801	38	1	5.76	-144.5
江蘇	32.0°N	118.7°E					
山東	37.5°N	122.0°E	4 541	40	1	3.47	-145.0
新疆	43.5°N	87.2°E					
北京	39.9°N	116.4°E	9 084	41	1	1.09	-146.2

注3：受信機の帯域幅と同等の参照帯域幅を使用して、受信機入力電力を供給。計測精度を小数点以下1桁に見直した場合。



ミックススペクトル上で以下の5つの型に分類することができる。この中で特にII型とIV型は地磁気嵐の発生に関係することが多い。

- ・I型：メートル波帯において継続時間1秒以下、帯域幅が数MHzのバーストが群となって出現する現象。出現帯域幅は200MHzを中心とした100MHz幅程度に限られた現象で、数時間から数日間継続することもある。活動的な黒点が太陽面にあることを示す指標となる。
- ・II型：フレア発生後数分から10分後に始まり、メートル波からデカメータ波帯にかけてゆっくりと周波数を下げていく電波放射で、数分から10分間程出現する。フレアに伴うショック前面で発生するプラズマ波により発生し、ショックが太陽大気上方に伝搬するとともに、コロナの電子密度が下がっていくため、時間とともに周波数がゆっくりと下がっていく負の周波数ドリフトとして観測される。周波数の下がる割合（周波数ドリフト率）は通常1MHz/s以下である。コロナ中の電子密度分布が分かればショックの速さを見積ることができる。II型が発生しさらに後述のIV型が発生すると、数日後に地磁気嵐が発生する確率が高くなる。
- ・III型：フレア発生直後にメータ波からデカメータ波帯にかけて出現する大きな負の周波数ドリフト（～100MHz/s）を示す現象。フレアに伴う電波バーストとしてはもともと普通に現れ、群として出現することもある。
- ・IV型：センチメータ波からデカメータ波帯までの広い範囲で発生し、II型とともに地磁気嵐との関わりでは重要な指標となるバースト。II型に引き続いて発生した場合は、フレアに伴ってプラズマの塊が太陽から放出されたことを示唆しており、数日後に地磁気嵐の発生する確率が高くなる。
- ・V型：メータ波帯からデカメータ波帯にかけてIII型に引き続いて発生する広帯域放射現象で、継続時間は数分程度。

本装置について、ITU-Rでは、保護すべきものをリスト化しようとする動きが見られる。受信する帯域が非常に広く利用も多いことから、周波数保護の考え方は他の装置とは分けて検討するべきと考えられ、現状特段の対応は取られていない。

### 3.2 惑星間空間シンチレーションモニタ (IPS monitor)

惑星間空間シンチレーションモニタ (IPS monitor) は、太陽から放出されたコロナガスを、太陽系外の天体（例え

ばクエーサーと呼ばれる電波を放射する銀河など）を用いて観測する装置である。太陽系外の天体からの電波を継続的に観測しているときに、太陽風やCMEによるコロナガスが天体と地球との間を横切ると、天体からの電波を散乱する。この電波での瞬きを惑星間空間シンチレーションと呼ぶ。特にCMEは周辺の太陽風よりも強く電波を散乱する特徴があるため、ある天体を電波で観測中にその電波強度が激しく変動する時には、CMEが地球と天体の間を横切っていることが分かる。

日本国内3か所に設置されている名古屋大学宇宙地球環境研究所の装置<sup>[3]</sup>は、電波天文保護バンドである327MHz帯域において電波天文業務としての認可を受けて観測が行われており、本帯域は宇宙天気利用の観点からも重要な保護の対象になっている。一方、世界各国の惑星間空間シンチレーションモニタは、必ずしも電波天文保護バンドで運用が行われている訳ではなく、今後の対応について議論が期待される。

### 3.3 GNSSレーバ

GPS等の全球測位衛星システム (GNSS) は、複数の衛星からの信号をGNSSレーバにより受信し、受信地点における位置を同定する仕組みである。電離圏を通過する電波は経路における電子の総数に応じて影響を受ける。電離圏の電離の状況を示すパラメータとして、全電子数 (Total Electron Content: TEC) がある。TECは、測位衛星から受信機までの電波伝搬経路に沿った単位断面積当たりの電子数として定義され、一般に1TECU (TEC Unit) =  $10^{16}$  [個/m<sup>2</sup>] が単位として用いられる。GPS衛星を例にとると、測位信号を送信しているL1信号 (1.57542GHz) 及びL2信号 (1.2276GHz) の2周波の伝搬遅延の差を取ることによって、経路上の全電子数を計測することが可能になる。<sup>[4]</sup>

また、電離圏の空間的不規則構造によりシンチレーションが発生することが知られているが、これを示すパラメータとして一般にS4と $\sigma\phi$ が用いられることが多い。S4とは平均信号強度 (振幅) で正規化した信号強度の標準偏差として求められる。また、 $\sigma\phi$ は振幅の変動を表すS4に対して、搬送波の位相の標準偏差として計算される。

本装置については、本来の用途が衛星測位であり、周波数の保護は衛星測位としての利用について取られていると考え、宇宙天気利用としての検討は特段進めていないのが現状である。



### 3.4 リオメータ

リオメータは、天体や銀河から放射される周波数約20～100MHzの宇宙電波強度を正確に測定することによって、電離層の相対的な不透明度を測定するために使用される装置である。

太陽以外の恒星や銀河からの宇宙電波強度は基本的に安定しており、地上の1点で観測する場合には地球の自転・公転に伴い緩やかな変動を示す。しかしながら、電離圏D領域（高度60～100km）の電子密度が増大すると銀河電波が吸収され、受信強度が非常に短い時間スケールで減少する。これによりD領域の電子密度の変動を定量的に測定するのがリオメータの観測手法である。

このような急激なD領域の電子密度増加を引き起こす主な原因は、(1) オーロラに伴う数10keV以上の高エネルギー電子の降り込み、(2) 太陽フレアに伴って発生する10MeVを超える高エネルギープロトンの極冠域への降り込み、(3) 太陽フレアに伴うX線放射、等による大気電離である。D領域の電子密度の増大は短波帯の吸収による電波伝搬を妨げるため、短波通信に影響を与える。

表3は、現在ITU-Rで検討中の典型的な観測周波数におけるリオメータの干渉基準案である。

■表3. 典型的な観測周波数におけるリオメータの干渉基準

周波数 $f_c$ (MHz)	帯域幅 $\Delta f$ (MHz)	最小アンテナ 雑音温度 $T_A$ (K)	受信機雑音 温度 $T_R$ (K)	システム感度		干渉基準		
				温度 $\Delta T$ (mK)	電力スペクトル 密度 $\Delta P$ (dB (W/Hz))	入力電力 $\Delta P_H$ (dBW)	pf $d$ $S_H \Delta f$ (dB (W/m <sup>2</sup> ))	スペクトル pf $d$ $S_H$ (dB (W/ (m <sup>2</sup> Hz)))
20	0.25	20000	200	40400	-213	-169	-181	-235
30	0.25	7900	200	16200	-217	-173	-181	-235
38.2	0.25	4600	200	9600	-219	-175	-182	-236
51.4	0.25	2300	200	5000	-222	-178	-182	-236

## 4. おわりに代えて —今後の課題—

宇宙天気はこれまで周波数保護の対象となっていなかったこともあり、観測環境が非常に悪化している装置もある。例えばリオメータは、放送波に対して微弱な銀河雑音を受信することから、都市から遠く離れた場所の設置が必須となっている。銀河電波を受信するという点では天文学における電波望遠鏡と本質的には同一のものである。これまでITU-Rでは、宇宙天気センサを気象援助業務に位置付ける考え方が主流であったが、2021年秋になって電波天文バンドを使用するものは少なくとも電波天文業務の一部とする考え方が現れた。今後のさらなる議論が期待される。

また、太陽分光計のように非常に広い周波数帯を観測する装置の場合には、周波数全体を保護することは現実的ではなく、観測装置の近傍に限り制限するなどの措置が必要と思われる。

### 参考文献

- [1] Report ITU-R RS.2456-0 (06/2019), Space weather sensor systems using radio spectrum, RS Series, Remote sensing systems,
- [2] 直井隆浩、久保勇樹、石橋弘光、太陽電波監視システム、情報通信研究機構研究報告、2021年10月、Vol.67, No.1 page 165-175.
- [3] 岩井一正、宇宙の嵐を正確に予報する新システム、Isotope News, 2020年4月号 No.768.
- [4] 西岡未知、津川卓也、GNSS受信機を用いた電離圏全電子数の高解像度二次元観測、情報通信研究機構研究報告、2021年10月、Vol.67, No.1 page 55-65.