

【自由論題：宇宙天気現象】

作戦等に対する宇宙天気現象の影響

航空研究センター運用理論研究室
2等空佐 奥田 智洋

はじめに

一般的に天気現象といえば、晴、曇り及び雨のように地球の大気圏内で生じているものであり、日々これらの影響を受ける私達には、大変馴染み深い自然現象である。この天気現象と同様、宇宙においても日々変化する自然現象が存在しており、それらは宇宙天気現象と呼ばれる。

宇宙天気現象とは、主に太陽活動が源となって発生する、地球近傍における宇宙の諸現象のこと¹を指しており、人工衛星、レーダー、通信及び測位、さらに極端な場合には、地球上の電力網にまで様々な影響を与える場合がある。例えば、極域にオーロラが発生しているということは、太陽から放出された高エネルギーの粒子が、地球に降り込んでいることを示しており、その粒子が増加すると、オーロラを通過した人工衛星に障害が引き起こされる場合がある²。

宇宙天気現象は、第2次世界大戦中から作戦等³に影響を与えていたことがわかっている⁴。当時、英国が開発した防空レーダーは、独空軍の侵攻を阻止するのに重要な役割を果たしており、活発な太陽活動により、英国の防空レーダーに大規模なノイズが発生した際、英国は独空軍による電波妨害を疑い、その能力を調査しなくてはならなかった⁵。1942年、特に激しい太陽活動が発生した際、ノイズの原因が、後で説明する太陽電波バーストであったことが明らかとなり、同時に太陽からの放射線が発見されたが、これらの発見は、第2次世界大戦が終わるまで報告されることはなかった⁶。この例のように、宇宙天気現象は作戦等に対し、様々な影響を与えていると考えられるが、未解明の部分もあるため、研究等も限られている。

本稿の目的は、宇宙天気現象に関する理解を深め、作戦等に対する宇宙天気

現象の影響について考察することである。本稿では、まず宇宙天気現象とそれらの影響について概説する。次に、宇宙天気現象が作戦等に影響を与えた事例について、公刊文献等で明らかなものを列挙しつつ、宇宙天気現象、特に太陽活動の周期による作戦等への影響を考察する。そして、最後に宇宙天気現象に関する国内外の動向について紹介する。

1 宇宙天気現象とは何か

宇宙天気現象について、本稿では国立研究開発法人情報通信研究機構（National Institute of Information and Communications Technology : NICT）が文部科学省新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」の下、国内関係機関と協力し、2020年10月7日に発表した報告書「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価⁷⁾」（以下「報告書」とする。）を基に概説する。この報告書は、日本で初めて宇宙天気現象の社会影響を網羅的に検討、評価したものであり、将来起こりうる災害レベルの宇宙天気現象について、正しい知識を普及し、宇宙利用に関わる事業者等が適切な対応策を取ることで、宇宙天気現象に対して社会的な強靱性が増すことを期待するものである⁸⁾。

（1）宇宙天気現象の影響について

宇宙天気現象に関し、過去の文献や観測データ等を基に評価し、衛星運用、通信、放送、測位等のそれぞれの分野において、社会的に大きな影響を与える現象がどのくらいの頻度で発生する可能性があるのか、報告書がまとめた結果を表に示す。

各分野のうち、人工衛星運用、通信・放送、測位利用及び航空運用の分野では、1回／10年の頻度で、バックアップの準備等の適切な対応を要する（黄色）か、運用の継続が困難になる（赤色）と評価しており、通信に関しては、スプラディックE層と呼ばれる現象のように、日常～複数回／年で発生するものもある。各分野の影響と被害に対して、障害を起こし得る宇宙天気現象は複数存在しているため、障害が発生した際にその原因を直ちに特定することは困難であると考ええる。しかし、宇宙天気現象が作戦等に対して与える影響を理解しておくことは、突如発生した障害が何者かによって意図されたものか否かについて、迅速に判断するために大変重要である。

表 各分野における宇宙天気の影響と頻度

		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				
分野	影響と被害	障害を起こ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	
電力	停電（送電線の過電流）	地磁気誘導電流（GIC）						
衛星運用	宇宙機（表面帯電）	高エネルギー電子						
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	スボラディック嵐						
測位利用	測位精度の劣化	電離圏正相嵐						
		プラズマバブル						
		電離圏シンチレーション						
航空運用	通信障害（地上航法援助用放送を含む）	デリンジャー現象						
		極冠吸収（PCA）						
		プラズマバブル						
		スボラディック嵐						
	測位精度の劣化	電離圏正相嵐						
		プラズマバブル						
		電離圏シンチレーション						
	航空乗務員の被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）						
有人宇宙活動	宇宙飛行士被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）						
地上生活	地上での被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）						

出典：情報通信研究機構『太陽フレアなど宇宙天気による社会への影響を評価』2020年10月7日、<https://www.nict.go.jp/press/2020/10/07-1.html>（令和3年8月5日アクセス）。

また、表には示されていないが、レーダー障害や測位精度の劣化を引き起こす宇宙天気現象の一つとして、太陽電波バーストがある。太陽電波バーストは、太陽が発する電磁波がノイズとなり、目標信号を覆い隠すことで、レーダー障害や測位精度の劣化を引き起こすものである。報告書でも言及はされているが、太陽電波バーストの発生頻度に関する解析が不十分であり、その影響は受信機の性能に依存するため、定量的評価が困難であるとしている⁹。太陽電波バーストの影響は、短波（HF）帯、超短波（VHF）帯、極超短波（UHF）帯、マイ

クロ波（SHF）帯までの広い範囲に及ぶ¹⁰。そのため、宇宙天気現象により作戦等が影響を受けた事例として後で紹介するとおり、特に注意が必要である。

（２）作戦等に影響を与え得る宇宙天気現象

次に、作戦等に影響を与え得る宇宙天気現象について概説するため、太陽から到来する現象と地球周辺の宇宙空間の構造、それらのじょう乱（定常状態からの乱れ）が社会影響に至る過程を図1に示す。

太陽から約1億5,000万km離れた地球には、①電磁波（γ線、X線、紫外線、可視光、赤外線及び電波など）、②放射線（太陽放射線）、③太陽風（太陽から外に絶えず吹き出すコロナガスの流れ）という3種類の現象として、太陽からの影響が常に到来している¹¹。太陽表面で太陽フレアと呼ばれる大規模な爆発現象が発生する際、広い波長帯の電磁波が急激に増加することを「太陽電波バースト」と呼び¹²、同時に放出される高いエネルギーを持つ太陽放射線を「太陽高エネルギー粒子」と呼ぶ¹³。さらには、太陽コロナのガスが大規模に放出されるコロナ質量放出（Coronal Mass Ejection : CME）現象が発生し、じょう乱を引き起こしながら1日から5日程度かけて地球へ到来する¹⁴。

一方の地球は、磁気圏と電離圏という二重のバリアによって、太陽から守られている。磁気圏とは、地球が持つ磁場により、太陽高エネルギー粒子と太陽風の侵入を妨げている領域のことである。磁気圏は、太陽風によって吹き流され、彗星の尾のような構造を作っており、太陽風と磁気圏の相互作用によってその構造は大きく変化する¹⁵。このじょう乱を「磁気圏じょう乱」と呼ぶ。そして、磁気圏の内側には、太陽高エネルギー粒子が地球の磁場に捉われている放射線帯が存在する¹⁶。

電離圏とは、地球の高層大気が太陽から放射されるX線や紫外線を吸収し、その一部がイオンと電子に電離したプラズマ（電離気体）として存在する領域である。電離圏は高度60kmから1,000km以上に存在し、低い方からD領域、E領域及びF領域と呼ぶ¹⁷。電離圏にも様々なじょう乱が発生しており、それらを「電離圏じょう乱」と呼ぶ。

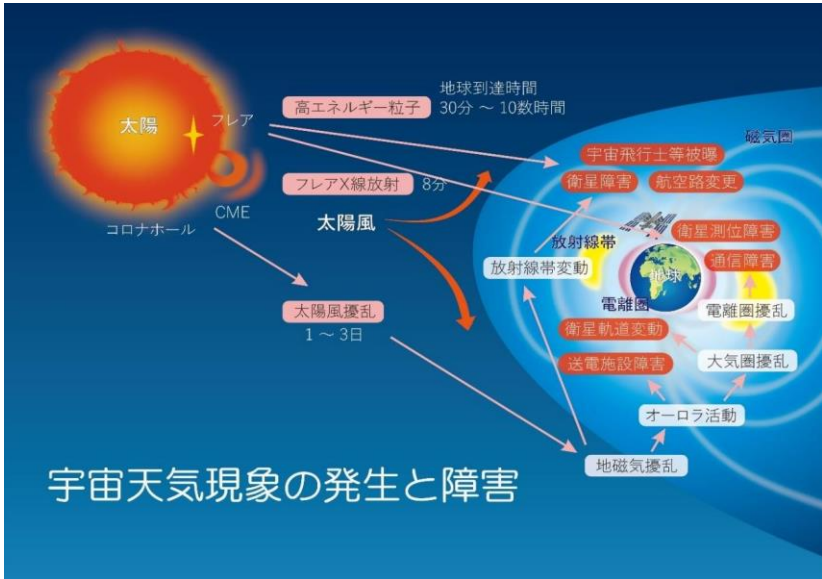


図1 宇宙天気現象の発生と障害

出典：太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』
2020年10月7日、3頁。

ア 太陽電波バースト

太陽フレアや CME が発生する際、同時に引き起こされる強い電波放射のことを太陽電波バーストと呼ぶ。非常に強い太陽電波バーストは、レーダーや衛星の測位信号を受信する際のノイズとなり、レーダー障害を引き起こしたり、測位に影響を与えたりすることがある。一方で、太陽電波バーストは、その発生から 8 分で地球へ到達するため、CME の発生や太陽近傍における衝撃波の形成、それらの伝播速度などを知る手がかりとなり、宇宙天気現象を予報するための重要な観測データの 1 つとなっている¹⁸。

イ 太陽高エネルギー粒子

太陽フレアや CME により、太陽コロナが高いエネルギーを持つまで加速されたものを、太陽高エネルギー粒子（Solar Energetic Particle : SEP）あるいは太陽放射線と呼ぶ¹⁹。SEP は太陽から 30 分～10 数時間で地球に到来し、地球のバリアである磁気圏内に侵入し、次のような影響を及ぼす。

（ア）シングルイベントアップセット

SEP が人工衛星を直撃すると、デジタル信号に異常を引き起こし、メモリエラーなどに繋がる事例が複数報告されている²⁰。このような半導体論理回路の誤動作、または故障をシングルイベントアップセット（Single Event Upset : SEU）と呼ぶ。SEU により、衛星の姿勢を制御するセンサーなどに異常が発生すると、衛星の姿勢が乱れる原因となる²¹。

（イ）太陽電池の劣化

SEP が人工衛星の太陽電池を直撃すると、材質を変性させ、発生電流と電圧の減少を加速させ、太陽電池が劣化することにより衛星の寿命を縮める場合がある²²。

（ウ）極冠吸収

地球に到来した SEP は、磁気圏の磁力線に沿って極域に侵入する。この時、電離圏の D 領域における電離が急激に進み、極域における電波吸収が増加し、短波通信ができなくなる場合がある。これを極冠吸収（Polar Cap Absorption : PCA）と呼ぶ²³。極域においては、地上に超短波（VHF）帯の通信局がなく、赤道上空の静止軌道にある衛星による衛星通信も利用できないため、主な通信手段となる短波通信が利用できなくなる影響が他の地域に比べて大きい。よって、PCA が発生している間は通信不良のため、航空機は航路の変更を余儀なくされる場合がある²⁴。

（エ）GLE

地球に到来した SEP により生成した二次粒子（中性子等）の影響で、地表面で放射線量が短期間に上昇する現象を Ground Level Enhancement : GLE と呼ぶ。GLE が発生すると、航空機高度での被ばくが、通常の銀河宇宙線による被ばくと比較して 10 倍以上も上昇する場合がある²⁵。

ウ 磁気圏じょう乱（サブストーム、磁気嵐）

太陽風と磁気圏の相互作用により、複雑な電流の変化が磁気圏内にじょう乱を発生させる。磁気圏構造の変形を伴うじょう乱をサブストーム（Substorm）と呼び、サブストームに伴うエネルギーの注入と磁気圏の変形が一定時間継続することで発生する大規模なじょう乱を磁気嵐と呼ぶ。サブストームは 1～数時間程度の現象であるのに対し、磁気嵐は日単位の現象となる²⁶。これらの磁気圏じょう乱（サブストーム、磁気嵐）に伴い、電離圏や放射線帯が大きく変動するため、次のような影響を及ぼす。

（ア）地磁気誘導電流

地磁気の変動により、地殻あるいは地下に電場が誘導されると、地磁気誘導電流（Geomagnetically Induced Current : GIC）と呼ばれる電流が発生する。これが長距離を結ぶ電力網や金属パイプに流れると、システムの障害を起こしたり、金属パイプの腐食を促進したりする場合がある。特に電力網では、発生した地磁気誘導電流が接地された発電所や変電所の変圧器を通じて流入し、変圧器が過熱されたり、保護用リレーが誤動作を起こしたりするため、大規模な停電が発生する場合がある²⁷。

（イ）超高層大気の加熱

太陽フレアや磁気嵐に伴うエネルギー流入により、地球の超高層大気が加熱されると、大気が膨張し、衛星に対する大気摩擦が増加する。低軌道の衛星にとって、大気摩擦は衛星を減速させ、軌道が低下する原因となることから、軌道を維持するための燃料消費を早め、結果として衛星の寿命が短くなる場合がある²⁸。また、大気摩擦により衛星の姿勢制御が困難となり、太陽電池に対する日射量が減少することでバッテリーが枯渇し、制御不能に陥る場合もある²⁹。

（ウ）放射線帯変動

太陽風、CME の到来後に放射線帯の電子密度が増加する現象が発生する。この現象により静止軌道にある衛星の帯放電リスクが高まる³⁰。放射線帯の電子が衛星の深部まで侵入し、帯電を起こす現象を深部帯電と呼ぶ。深部帯電は、表面帯電に比べて帯電を解消するのが難しいほか、内部の集積回路に不具合をもたらす場合がある。特に近年では、部品の高性能化に伴い、深部帯電による被害は顕著になっている³¹。

エ 電離圏じょう乱（電離圏嵐）

電離圏における電子密度は昼間に増加し、夜になると減少するという日周期の変化をしている。この周期的な変化のほかに、電離圏では様々なじょう乱が発生し、これを電離圏嵐と呼ぶ。電離圏嵐には、電子密度が大きく増える電離圏正相嵐（ポジティブストーム）と電子密度が大きく減る電離圏負相嵐（ネガティブストーム）とがある。電離圏嵐による電子密度の増減は、いずれも数時間から数日間の短期的な現象であるが、電波の吸収や散乱などにより、次のような現象を引き起こす³²。

（ア）デリンジャー現象

太陽フレアによる X 線や紫外線の急増が原因で、昼間側の電離圏における電子密度が急増し、電波伝播にじょう乱が発生する。そのうち、短波（HF）帯が

吸収される現象を、発見者の名前にちなんでデリンジャー現象と呼ぶ³³。

電離圏の最下部にある D 領域（高度 80km 付近）は電波を吸収し、その吸収量は D 領域の電子密度が高いほど大きく、周波数が低いほど影響される。通常、短波（HF）帯の電波はほとんどが D 領域を通り抜け、主に電離圏の F 領域で反射されて長距離伝播する。しかし、太陽フレアが発生すると、電離圏では異常に電離が進むため、D 領域の電子密度が高くなることで電波吸収が大きくなる。電波伝播の経路上において、吸収が発信強度よりも大きいとき、通信途絶が発生することになる。そのため、太陽活動が活発な時期は、デリンジャー現象が頻繁に発生する³⁴。

（イ）スプラディック E 層

電離圏 E 領域（高度 100km 付近）では、電子密度の高い層が突然生成される事がある。この層をスプラディック E 層（Es 層）と呼ぶ。スプラディック（Sporadic）というのは、突発的・散発的という意味である。Es 層は、他の宇宙天気現象とは異なり、太陽活動との関連は小さい³⁵。日本付近では季節的に春～夏、1 日では昼間や夕方によく発生することがわかっているが、その発生原因やメカニズムは不明である。また非常に局所的かつ間欠的に発生するため、その発生場所や時間を予測することは非常に難しい。Es 層が発達した場合、通常は電離圏で反射されない超短波（VHF）帯の電波が反射されて伝播するため、通信障害を起こす場合がある³⁶。

（ウ）プラズマバブル

赤道域や低緯度の電離圏において、局所的に電子密度が低い泡のような現象が発生することがある。このような現象をプラズマバブルと呼ぶ。発生メカニズムはまだ解明されていないが、多くの場合、プラズマバブルは日没時刻頃に赤道域で発生し、磁力線に沿った構造を持つ。そして、高緯度及び東向きに伝播することがわかっている。太陽活動が活発な時期や磁気嵐が発生した時は、プラズマバブルが大きく成長し、日本上空にまで及ぶこともある。プラズマバブルやその周辺では、電子密度の変化が大きいため、衛星からの電波が乱されて、通信障害や測位精度の劣化を引き起こす場合がある³⁷。

（エ）電離圏シンチレーション

電離圏において衛星からの電波が乱され、強度および振幅が変動する現象を電離圏シンチレーションと呼ぶ。シンチレーションとは、星のまたたき、ゆらぎ、という意味である。電離圏シンチレーションは、主に超短波（VHF）帯や極超短波（UHF）帯の電波を使った衛星通信に影響を与えるが、マイクロ波

（SHF）帯にまで影響を与える強いシンチレーションが起こることも報告されている³⁸。また、電離圏シンチレーションのために、測位衛星からの電波が受信できなくなり、測位精度が劣化するという報告もある。米国などでは、全地球測位システム（Global Positioning System : GPS）を用いた航空機の離着陸システム導入が検討されているが、測位精度の劣化をいかに小さくし、信頼性のあるシステムにするかということが大きな課題となっている³⁹。

2 宇宙天気現象により作戦等が影響を受けた事例

ここまで、報告書を基に宇宙天気現象が与え得る様々な影響を概説してきたが、宇宙天気現象に馴染みがない読者にとって、これらを理解することは容易ではない。そこで、実際の作戦等が宇宙天気現象の影響を受けた事例をいくつか紹介する。公刊文献での公表はあまりにも少ないが、実際にはより多くの事例があるものと推測する。

（１）太陽電波バーストに伴う早期警戒レーダーの障害

1967年5月23日、大規模な太陽活動により、米国の弾道ミサイル早期警戒システム（Ballistic Missile Early Warning System : BMEWS）レーダー及び無線通信に障害が発生した。米ソ冷戦中の当時、BMEWSレーダーは米、英、加の3箇所に設置され、極超短波（UHF）帯の440MHzで運用されていた⁴⁰。

BMEWSレーダー及び無線通信に障害が発生した際、米国戦略航空軍司令部の将校は、旧ソ連軍による意図的な電波妨害の可能性があると見て、直ちに北米航空宇宙防衛司令部（North American Aerospace Defense Command : NORAD）と国家軍事指揮センターに連絡し、警戒態勢を通常の状態から核兵器を搭載した爆撃機を緊急発進可能な状態まで引き上げた。その後、NORADの宇宙天気現象に関する情報から、これらの障害は宇宙天気現象が原因である可能性が高いと判断され、通常の警戒態勢に戻ることが出来た。もし、米国がそのまま爆撃機を緊急発進させていた場合、無線通信にも障害が発生していた当時の状況では、爆撃機を引き返させることが困難であった可能性が高く、この事例は米ソ間に核戦争が勃発する寸前の出来事であった⁴¹。

この時に発生した太陽電波バーストは、短波（HF）帯からマイクロ波（SHF）帯まで広い範囲の電磁波に障害を与え、米軍の指揮統制と意思疎通に大きな影響を与えた。さらに、数時間後に地球へ到来したSEPにより、極冠での短波通信が途絶えるとともに、記録的な磁気嵐と電離圏嵐が発生したため、混乱はさらに拡大した。そのため、この事例をきっかけとして、米空軍は大気中におけ

る天気観測、分析、警報、予測を宇宙の領域まで拡大することとなった⁴²。

（２）太陽電波バーストと磁気嵐に伴う通信障害及び大規模停電

1989年3月10日、大規模な太陽活動により発生した太陽電波バーストは、直ちに通信障害を引き起こし、欧州では旧ソ連による電波妨害が疑われた⁴³。これに続いて、3月13日には最大級の磁気嵐が発生したため、米国ニュージャージー州とカナダのケベック州で GIC による大規模な停電が発生した。ケベック州の停電は約9時間に及び、州内842,000件（ほぼ600万人）の大半が被害を受けた⁴⁴ため、この磁気嵐はケベックストームとして有名である⁴⁵。

この当時、影響を受けたことが公表されている数少ない軍事活動の1つが、当時ナミビアに展開していた国際連合平和維持軍の豪陸軍部隊である。一連の大規模な太陽活動は、豪陸軍部隊の分遣隊がナミビアに到着した直後に発生し、分遣隊が使用する無線通信の障害は、1～2ヶ月に及んだ。ナミビアの分遣隊には、宅配便以外の代替連絡手段がなかったことから、平和維持活動後半では、豪陸軍司令部と通信を行うため、国連から高出力無線機の提供を受けた⁴⁶。

（３）電離圏のプラズマバブルに伴う通信障害の可能性

2002年3月2日、米軍とアフガニスタン軍は、アフガニスタン山岳部にいるアルカイダやタリバンの部隊を一掃するため、アナコンダ作戦を開始した。

2002年3月4日未明、米軍レンジャー部隊を乗せたヘリコプターは、タクル・ガー山（標高3,191m）の山頂付近で米海軍特殊部隊を救出するよう指示された⁴⁷。ヘリコプターが現地へ向かう間、UHF SATCOM⁴⁸を通じ、ロケット弾や重機関銃で武装したアルカイダやタリバンの部隊が山頂にいるため、山頂を避けて着陸するように指示があった。しかし、通信障害により指示は届かず、ヘリコプターが山頂へ着陸を試みたため、激しい銃撃を受けたレンジャー部隊の兵士7名が戦死するという事態が発生した⁴⁹。当初、通信障害の原因は、ヘリコプターに搭載された無線機の性能低下と地形によるものと推定されたが、その後の研究により、この時期のアフガニスタン地域で頻繁に発生した電離圏のプラズマバブルが通信に影響を与えた可能性があることが示された⁵⁰。

（４）太陽電波バーストに伴う世界的な GPS 信号の障害

2006年12月13日、太陽電波バーストに伴い、太陽の光が当たっている地球の昼側半分にある多くの GPS 受信機に障害が発生した。太陽電波バーストが最も強い時間は数分から数十分間であり、その間に民間の GPS 受信機が深刻な影響を受けた。もし、この障害が長時間に及んでいたら、GPS ユーザーは運用中断を余儀なくされるため、経済活動や交通に重大な影響が生じていた可

能性がある⁵¹。

米国海洋大気庁（National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA）が当時発表したメモによると、シュリーバー空軍基地の GPS オペレーションセンターは航空機が GPS サービスを失ったことを認めた、と明記しているが、GPS 受信機の種類（民間用か軍用か）は明記していない⁵²。この後、ロサンゼルス空軍基地の Space and Missile Systems Center's GPS Wing が GPS World に寄せたレターでは、軍用ユーザーに影響があったことを示す証拠はなく、NOAA が発表したメモは民間ユーザーに対する言及である、と主張している⁵³。

（５）太陽電波バーストに伴う航空管制レーダーの障害

2015 年 11 月 4 日、スウェーデンをはじめとする欧州の一部の国で空域の一部が閉鎖された。スウェーデンの航空管制当局が公開した情報によると、航空交通管制の二次監視レーダーシステムが航空管制官に適切な情報を表示できなかったため、安全上の理由から航空機の動きを抑えたとされている⁵⁴。なお、航空交通管制の二次監視レーダーは、発信源となるレーダーから航空機に搭載されたトランスポンダに質問を送信し、航空機の識別情報、航空機の気圧高度など、航空機に関する情報を取得するものであり、極超短波（UHF）帯の電波を使用している⁵⁵。この時のレーダー障害は、約 90 分間、複数同時に発生し、レーダーアンテナが太陽方向を向いている時に発生した。この時、障害が発生した時間と太陽電波バーストのピーク時間が一致していることから、レーダー障害の原因は、宇宙天気現象である可能性が高い⁵⁶。

なお、同じ時間帯にグリーンランドのチューレ空軍基地に着陸した航空機から、超短波（VHF）帯を使用した計器着陸装置（Instrument Landing System: ILS）ローカライザー⁵⁷の異常が報告されたが、着陸後の点検では、ILS 機器の不具合は確認出来なかった⁵⁸。

3 宇宙天気現象が作戦等に影響を与えた時期について

次に、宇宙天気現象が作戦等に影響を与えた時期について考察する。太陽活動は、約 11 年の周期で活発な時期と静穏な時期を繰り返している⁵⁹。太陽活動が活発な時期は、太陽の黒点数が多く、太陽フレアも発生しやすくなることから、太陽の黒点数は太陽活動の 1 つの指標として知られている。太陽の黒点数が極小期から極大期を経て、再び極小期に至るまでの約 11 年を太陽活動周期（Solar Cycle）と呼び、天文学者が観測を開始した 1755 年以降を第 1 周期と

して、順に番号がつけられている⁶⁰。

図 2 に第 17～25 周期の太陽黒点数を示す。第 2 次世界大戦中に宇宙天気現象が作戦等に影響を与えた 1942 年、そして、本稿で紹介した 5 つの事例中、次の 4 つの事例において、太陽活動が比較的活発な時期に発生していたことが明らかである。

- ・ 1967 年、太陽電波バーストに伴う早期警戒レーダーの障害
- ・ 1989 年、太陽電波バーストと磁気嵐に伴う通信障害及び大規模停電
- ・ 2002 年、プラズマバブルに伴う通信障害の可能性
- ・ 2015 年、太陽電波バーストに伴う航空管制レーダーの障害

一方、2006 年、太陽電波バーストに伴う世界的な GPS 信号の障害が発生したのは、太陽活動が活発な時期ではなかった。それに関わらず、太陽電波バーストはそれまでに報告された現象の約 10 倍もの規模であった⁶¹。このことは、太陽活動が活発な時期には、より強烈な太陽電波バーストが発生し、世界中の GPS 受信機、レーダーや通信に対し、より大きな影響を与える可能性があることを示唆している。

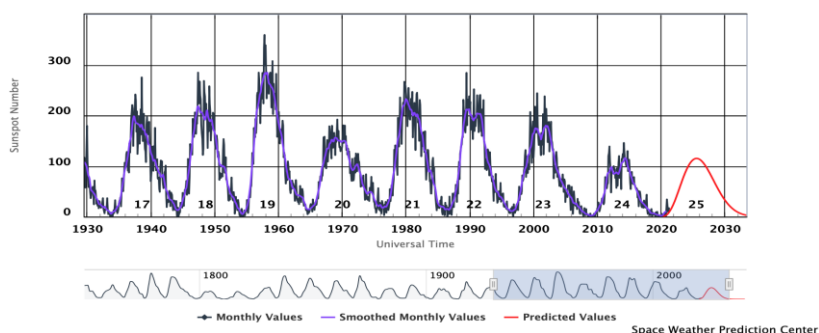


図 2 太陽黒点数の推移

出典：Space Weather Prediction Center / NOAA の下記ウェブサイトにて筆者作成
(<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>)

2009 年から始まった第 24 周期は 2014 年に極大を迎え、直近 100 年の中でも特に弱い太陽活動周期として記録されている⁶²が、2012 年 7 月 23 日には過去最大級の CME が発生した。幸い CME の発生場所が地球から見て太陽の裏側であったため、地球に影響を与えることはなかったものの、発生時期があと

1 週間早ければ、過去最大の宇宙天気現象に匹敵する磁気嵐を発生させた可能性がある⁶³。歴史上記録されている過去最大の宇宙天気現象は、1859 年 8 月～9 月に発生したキャリントン・イベントである⁶⁴。キャリントン・イベントでは、巨大な太陽フレアに伴い激しい磁気圏じょう乱が発生、各地で電信障害や電信局での火災が発生したほか、世界中でオーロラが観測されたことが記録されている⁶⁵。もし、2012 年 7 月 23 日の CME が地球を直撃し、磁気圏じょう乱が発生した場合、世界中で発生する停電や火災に加え、あらゆる人工衛星や GPS が機能停止に追い込まれた可能性がある。そして、このことは黒点数が少なく、太陽活動が比較的弱いとされている時期においても、大規模な宇宙天気現象が発生し得るということを示唆している⁶⁶。

米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration : NASA) と NOAA による太陽活動第 25 周期予測パネルは、2019 年 12 月から第 25 回目の太陽活動周期が始まっており、2025 年 7 月に極大期を迎え、第 24 太陽活動周期と同程度の強さになると予測している⁶⁷。このことは、引き続きキャリントン・イベントと同規模の現象がいつでも起こり得るということでもある。米科学アカデミーによると、キャリントン・イベントと同規模の宇宙天気現象が発生した場合、最初の 1 年間だけで現代社会が受ける経済的損失は 2 兆ドル（約 200 兆円）に達する可能性がある⁶⁸と推計されている。

太陽活動のメカニズムについては、未解明の部分が多く、大規模な宇宙天気現象がいつどのように発生するかを事前に予測することは困難である。一方で、安全保障分野に限らず宇宙利用は多くの分野で進められており、人工衛星の小型化等に伴い、その数は爆発的に増加している。そのため、現代社会は今まで以上に宇宙天気現象の影響を受けやすくなっており、ひとたび宇宙天気現象が発生すれば、人工衛星や GPS 機能の停止、レーダー障害及び通信障害など多くの影響が同時に発生し、作戦等の遂行が困難になる可能性がある。

4 宇宙天気現象に関する国内外の動向

宇宙天気現象を理解し、それらの影響を予測するための観測や研究開発は、国内外で進められていることから、ここでは日本及び国際機関等の動向について紹介する⁶⁹。

(1) 国内

日本では、NICT が 1952 年から太陽活動等の観測を開始し、1988 年から宇宙天気予報として情報提供及び配信を行っている⁷⁰。太陽活動の観測について、

エア・アンド・スペース・パワー研究（第9号）

NICT は鹿児島県指宿市にある太陽電波望遠鏡で太陽から放射される太陽電波の観測を行っている。また、米国の衛星が観測した太陽風のデータを、東京都小金井市にある太陽風観測データ受信システムで受信し、精度の高い太陽風情報を取得している。さらに、電離圏の観測では国内 4 か所（北海道、東京都、鹿児島県及び沖縄県）にあるイオノゾンデと呼ばれる短波レーダーを用いており、電離圏の電子密度に応じて反射されるエコーを観測することで、電離圏の状態を観測している⁷¹。NICT の宇宙天気予報センターでは、宇宙天気の現状把握と予報作成を実施しており、2019 年 12 月から 24 時間体制を構築し、1 日 2 回、宇宙天気予報の配信を行っている⁷²。

（2）国外

国際機関として、国際宇宙環境サービス（International Space Environment Service : ISES）が 1996 年に設立され、世界各国の機関が各種情報共有を行いながら、宇宙天気情報を配信している⁷³。近年では、国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization : ICAO）が宇宙天気情報の利用を義務化する動きがあり、2019 年 11 月から指定された 3 つの機関が 2 週間交代で宇宙天気情報の提供を始めた。これは、民間航空機の極域航路⁷⁴が増大する中において、宇宙天気現象による短波通信、衛星測位および被ばくリスクを回避することを目的としている⁷⁵。NICT 宇宙天気予報センターは、ICAO のグローバル宇宙天気情報センターの一員として、太陽活動に伴う通信や衛星測位への影響、放射線被ばく量等に関する宇宙天気情報の提供を行っている⁷⁶。

米国は、宇宙天気現象を地震や津波などと並ぶ自然災害リスクの 1 つとして位置付けており、2015 年に国家宇宙天気戦略、宇宙天気アクションプランを発表した⁷⁷（2019 年に改訂⁷⁸）。このアクションプランを受け、米国国務省は宇宙天気現象に関する国際協力の枠組み構築のため、他国との研究会など、活発な活動を展開している。米国で宇宙天気予報業務を担っているのは、NOAA 宇宙天気予報センター（Space Weather Prediction Center : SWPC）であり、1965 年から宇宙天気に関する情報を発表している。米国防総省では陸、海、空、宇宙、サイバー領域における作戦及び情報収集活動を支援するため、宇宙天気情報の提供が行われてきた⁷⁹。米空軍においては、第 557 気象団が宇宙天気関連活動のほとんどを担っているほか、空軍研究所等が宇宙天気に関する補助的な研究開発を実施している⁸⁰。米軍は、自身が運用しているシステムからだけでなく、NOAA や NASA 等他の連邦政府組織が運用しているものに加え、他国が運用しているシステムからも宇宙天気情報を収集し、地球規模のカバレ

ッジと全戦域の状況認識を可能としている⁸¹。

欧州では、欧州宇宙機関（European Space Agency：ESA）が宇宙天気調整センター（Space Weather Coordination Centre：SSCC）を設置しており、SSCC では太陽や電離圏の状況を観測、公開するとともに、衛星や宇宙飛行士に影響を与える可能性のある宇宙天気情報のアーカイブを公開している⁸²。特に英国は宇宙天気に関する文書を盛んに発表しており、国家に対する重大なリスクの1つとして宇宙天気現象を2012年に追加⁸³し、2014年には宇宙天気準備戦略を発表（2015年に改訂⁸⁴）、最新の国家リスクレジスター⁸⁵まで継続的に盛り込んでいる。

5 おわりに

以上、本稿では、宇宙天気現象とそれらの影響について概説し、宇宙天気現象が作戦等に影響を与えたいくつかの事例について紹介するとともに、宇宙天気現象が作戦等に影響を与えた時期について考察し、最後に宇宙天気現象に関する国内外の動向について紹介した。

宇宙天気現象は、これまでも人工衛星、レーダー、通信及び測位、さらに極端な場合には、地球上の電力網にも障害を引き起こしているが、宇宙に関連するシステムの数は今よりも少なく、影響が限定されていたため、一部の人間以外に認識されることは少なかった。しかし、近年の宇宙利用拡大に伴い、宇宙天気現象が与える影響も拡大していくと推測される。国内外では宇宙天気現象を自然災害リスクの1つとして捉え、いち早く現象の兆候を観測し、予報するための国際的な協力が進められているが、原因となる太陽フレアやCMEなどが、いつどこで、どのような規模で発生するのか、予報することは非常に困難である。さらに、警戒監視レーダーなどの防衛システムで発生した障害に関しては、得られる情報が少なく、それらの影響を適切に評価することは、未だに困難なままである。

宇宙天気現象が作戦等に対して与える影響を理解しておくことは、突如発生した障害が何者かによって意図されたものか否かについて、迅速に判断するため非常に重要となる。そのため、私達がやらなければならないことは4つある。第1に、宇宙天気現象に関する理解を深めること。第2に、NICTから発表されている宇宙天気情報を広く活用し、宇宙天気現象による影響が発生する可能性について掌握すること。第3に、警戒監視レーダーなどの防衛システムに障害が発生した際のデータを蓄積すること。そして第4に、蓄積したデータを省

エア・アンド・スペース・パワー研究（第9号）

庁・機関横断的に共有し、定量的な評価を行うことである。

2020年12月15日に宇宙開発戦略本部が決定した宇宙基本計画工程表の宇宙状況把握に関し、「防衛省は、宇宙空間の電磁的環境情報等に関しJAXAに加えて、宇宙天気情報の活用についてNICTとの連携を進める。」と明記されている⁸⁶。このことから、本稿をJAXA及びNICTとの連携を強化するにあたり、宇宙天気現象の理解を深めるための一助としたい。

-
- ¹ 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』2020年10月7日、<https://www2.nict.go.jp/spe/benchmark/pdf/科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響調査.pdf>.
- ² 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』17頁。
- ³ 本稿では、各国の軍隊及び自衛隊が目的達成のために行う行動や活動の全てを含む。
- ⁴ *Report of the Assessment Committee for the National Space Weather Program*, Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research (OFCM), June 2006, p. 5.
- ⁵ *Ibid.*
- ⁶ *Ibid.*
- ⁷ 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』。
- ⁸ 情報通信研究機構『太陽フレアなど宇宙天気による社会への影響を評価』2020年10月7日、<https://www.nict.go.jp/press/2020/10/07-1.html>（令和3年8月5日アクセス）。
- ⁹ 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』146頁。
- ¹⁰ 同上、9頁。
- ¹¹ 同上、2頁。
- ¹² 同上、8頁。
- ¹³ 同上、2頁。
- ¹⁴ 同上、6頁。
- ¹⁵ 同上、14頁。
- ¹⁶ 同上、2頁。
- ¹⁷ 同上、12頁。
- ¹⁸ 同上、8頁。
- ¹⁹ 同上、6頁。
- ²⁰ 同上、7-8頁。
- ²¹ 同上、117頁。
- ²² 同上、121頁。
- ²³ 同上、8頁。
- ²⁴ 同上、152頁。
- ²⁵ 同上、8頁。
- ²⁶ 同上、15頁。
- ²⁷ 同上、17頁。
- ²⁸ 同上、17頁。
- ²⁹ 同上、129頁。
- ³⁰ 同上、17頁。
- ³¹ 同上、114頁。
- ³² 同上、18-19頁。
- ³³ 同上、19頁。
- ³⁴ 同上、19-20頁。
- ³⁵ 同上、142頁。
- ³⁶ 同上、20頁。
- ³⁷ 同上、21頁。
- ³⁸ 同上、22頁。
- ³⁹ 同上、22頁。
- ⁴⁰ D.J. Knipp, et al., “The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses,” *Space Weather*, Vol. 14, Issue 9, August 9, 2016, p. 616.
- ⁴¹ *Ibid.*, p. 627.
- ⁴² *Ibid.*, p. 614.

- 43 Dr. Sten Odenwald, “The Day the Sun Brought Darkness,” *NASA*, March 14, 2009 (Last Updated: August 7, 2017), https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html.
- 44 H. Kirkham, Y. Makarov, J. Dagle, J. DeSteele, M. Elizondo and R. Diao, “Geomagnetic Storms and Long-Term Impacts on Power Systems,” *Pacific Northwest National Laboratory*, PNNL-21003, December 2011, p. 16.
- 45 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』86 頁。
- 46 Brendan Sowry ed., *United Nations Transition Assistance Group (UNTAG) in Namibia*, Australian Army Training Information Bulletin Number 63, 1992, pp. 50-51.
- 47 M. A. Kelly, J. M. Comberiate, E. S. Miller, and L. J. Paxton, “Progress toward forecasting of space weather effects on UHF SATCOM after Operation Anaconda,” *Space Weather*, Vol. 12, Issue 10, September 12, 2014, p. 602.
- 48 一般的に極超短波 (UHF) 帯は、300MHz~3,000MHz を指すが、ここで言う UHF SATCOM は、超短波 (VHF) 帯の 250MHz で運用されている。
- 49 Kelly et al., “Progress toward forecasting of space weather effects on UHF SATCOM after Operation Anaconda,” p. 602.
- 50 *Ibid.* p. 610.
- 51 A. P. Cerruti et al., “Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers,” *Space Weather*, Vol. 6, Issue 10, October 29, 2008, p. 8.
- 52 *Ibid.* p. 9.
- 53 *Ibid.* p. 9.
- 54 C. Marqué, K. L. Klein, C. Monstein, H. Opgenoorth, A. Pulkkinen, S. Buchert, S. Krucker, R. V. Hoof and P. Thulesen, “Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation,” *Journal of Space Weather and Space Climate*, Vol. 8, A42, 2018, p. 1.
- 55 *Ibid.* p. 3.
- 56 *Ibid.* p. 5.
- 57 計器着陸装置 (Instrument Landing System: ILS) は、着陸のため進入中の航空機に対し、指向性のある電波を発射し、滑走路への進入コースを指示する無線着陸援助装置のこと。ローカライザーは、ILS を構成する装置の一つで、航空機の進入方向 (コース) を示す電波を発射する。国土交通省、<https://www.mlit.go.jp/common/001264274.pdf> (令和 3 年 8 月 3 日アクセス)。
- 58 Marqué et al., “Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation,” p. 11.
- 59 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』10 頁。
- 60 同上。
- 61 Cerruti et al., “Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers,” p. 1.
- 62 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』10 頁。
- 63 D. N. Baker, X. Li, A. Pulkkinen, C. M. Ngwira, M. L. Mays, A. B. Galvin, and K. D. C. Simunac, “A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios,” *Space Weather*, Vol.11, Issue 10, September 19, 2013, p. 590.
- 64 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』30 頁。
- 65 James L. Green, Scott Boardsen, “Duration and Extent of the Great Auroral Storm of 1859,” *Advances in Space Research*, Vol. 38, 2006, p. 130.
- 66 D. N. Baker et al., “A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios,” p. 590.
- 67, “Solar Cycle 25 Forecast Update -Released December 9th, 2019-”, *Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration*, December 9, 2019, <https://www.swpc.noaa.gov/news/solar-cycle-25-forecast-update>.

- ⁶⁸ National Research Council, *Severe Space Weather Events --Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report*, National Research Council of the National Academies, The National Academies Press, 2009, p. 4.
- ⁶⁹ 米国の動向について詳細は、国立研究開発法人情報通信研究機構（北米連携センター）『米国における宇宙天気予報に関する動向等』平成 30 年 3 月を参照。
- ⁷⁰ 情報通信白書令和 2 年版、総務省、480 頁。
- ⁷¹ 同上、480 頁。
- ⁷² 同上、481 頁。
- ⁷³ 宇宙天気予報センター、<https://swc.nict.go.jp>（令和 3 年 8 月 3 日アクセス）。
- ⁷⁴ 本稿では、極地及びその周辺域を飛行する航空路のことを指す。
- ⁷⁵ 太陽地球圏環境予測『科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価』29 頁。
- ⁷⁶ 航空機被ばく警報システム WASAVIES、<https://wasavies.nict.go.jp>（令和 3 年 7 月 26 日アクセス）。
- ⁷⁷ National Science and Technology Council, US Government, *National Space Weather Strategy*, White house, October 2015, https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_nationalspaceweatherstrategy_20151028.pdf.
- ⁷⁸ National Science and Technology Council, US Government, *National Space Weather Strategy and Action Plan 2019*, White House, March 2019, <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>.
- ⁷⁹ U.S. Joint Chiefs of Staff, JP 3-14, *Space Operations*, 2018 (Incorporating Change 1: October 26, 2020), https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/jp3_14_ch1.pdf?ver=GfzjdjuluCyyHDS9D_RtkNA%3d%3d.
- ⁸⁰ Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, “The Federal Plan for Meteorological Services and Supporting Research—Fiscal Year 2017,” *ICAMS*, pp. 2-178, <https://www.icams-portal.gov/publications/fedplan/FCM-p1-2017.pdf> (last visited July 26, 2021).
- ⁸¹ Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, *The Federal Plan for Meteorological Services and Supporting Research—Fiscal Year 2017*, pp. 2-174 to 2-175.
- ⁸² 『情報通信白書』令和 2 年版、総務省、482 頁。
- ⁸³ Cabinet Office, UK, *National Risk Register of Civil Emergencies*, 2012 edition, January 2012, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/211858/CO_NationalRiskRegister_2012_acc.pdf
- ⁸⁴ Cabinet Office, UK, *Space Weather Preparedness Strategy*, Version 2.1, July 2015, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/449593/BIS-15-457-space-weather-preparedness-strategy.pdf.
- ⁸⁵ Cabinet Office, UK, *National Risk Register*, 2020 edition, December 2020, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/952959/6.6920_CO_CCS_s_National_Risk_Register_2020_11-1-21-FINAL.pdf
- ⁸⁶ 『宇宙基本計画工程表（令和 2 年度改訂）』（2020 年 12 月 15 日 宇宙開発戦略本部決定）、内閣府、https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy02/kaitei_fy02rev.pdf.