

2003年10月末から11月初旬にかけての宇宙環境とその影響について

Space radiation environment and its effect in from October to November 2003

総合技術研究本部 環境計測技術グループ

Expert group for space environment engineering

木本雄吾、松本晴久、古賀清一、越石英樹、中村雅夫、上野賢一郎、五家達夫

Y. Kimoto, H. Matsumoto, K. Koga, H. Koshiishi, M. Nakamura, K. Ueno, T. Goka

Abstract

Extremely huge solar storms happened in from 19 October to 6 November 2003. It affected some satellite operation and some satellite was killed by this event. We surveyed satellite anomalies and preparations and action for satellite during this event. This information will contribute to the satellite design and operation in the future. We also sent some users Satellite Environment Alert messages in this period. We present the survey results and the release status of the Satellite Environment Alert messages.

1. はじめに

2003年(平成15年)10月19日から11月6日にかけて、観測史上最大級の太陽フレアが地球近傍の宇宙放射線環境に大きな影響を及ぼした。この期間中にJAXA運用の2つの衛星に障害が発生した。ADEOS-IIの電力低下の障害については、宇宙開発委員会・調査部会で調査中であり、太陽フレアが直接の原因と特定されるに至っていないが、DRTSの障害は太陽フレアの影響である。これら状況を踏まえ、今後の衛星運用に資するために、今回の太陽フレアによる国内外の衛星障害及び運用管制上の太陽フレア対策に関する調査結果と本期間中に発信した太陽フレア警報について述べる。

2. 研究・調査の概要

- (1) 2003年(平成15年)10月19日から11月6日にかけての太陽フレアの調査結果
- (2) JAXA運用衛星、ミッションへの対応
- (3) 国内外の衛星障害及び運用管制上の太陽フレア対策の調査結果
- (4) 太陽フレア警報システムの内容及び発信状況

3. 成果概要

- (1) 2003年(平成15年)10月19日から11月6日にかけての太陽フレアについて

本期間中に観測至上最大級の太陽フレア(X線観測においては11月3日に観測されたX28の太陽フレアがこれまでの最大。10月28日に観測されたX17の太陽フレアは3番目)が発生した。これは10月18日に東のリムに現れた黒点群484と、続いて10月23日に現れた黒点群486が原因で、これらは西没後も活発であった。図1にX線で観測された太陽フレアについて示す。これら太陽フレアが原因でNOAAが定める磁気嵐指数G2(G2: やや活発。G1からG5まで5段階、G5が極めて活発)以上の磁気嵐が4回、10MeV以上のエネルギーを持つ陽子のフラックス値(個/cm²/sec/str)が10を超えるプロトン現象が6回起こった。

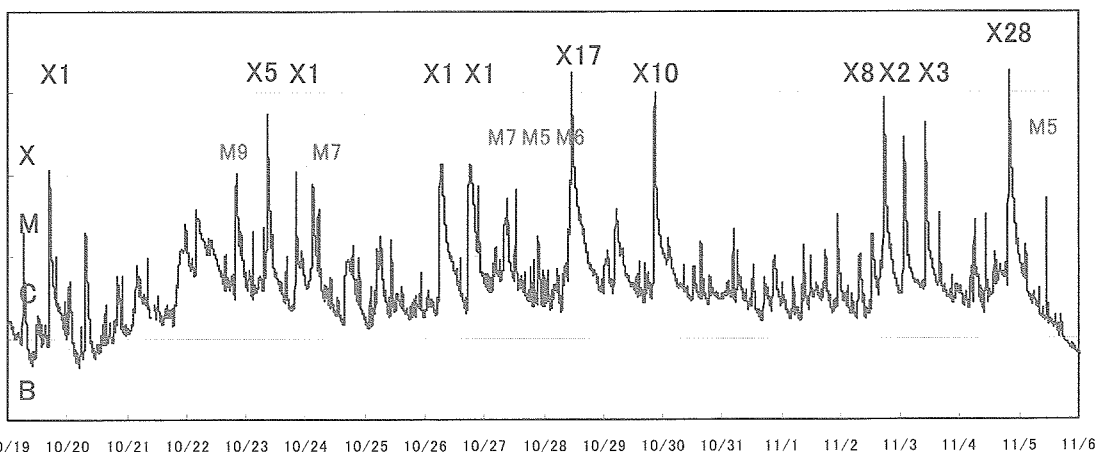


Fig.1 Solar activity in in from 19 October to 6 November 2003 (X-ray flux data from GOES-12)

(2) JAXA 運用衛星、ミッションへの対応

DRTS については、10月28日(UT)、地球センサ (ESA) のスパイク・ノイズで、主系、冗長系の切り替えが頻繁に起こり始めた (15:30-18:00 UT)。18:42UT に自動的に太陽捕捉モードに移行した。環境計測技術Gから、今すぐ復帰作業をしても、まだ陽子フルエンスが高い状態が約3日間程度続くことが想定されるので、安全モードのまま、静観することを勧告した。その後、太陽フレアが沈静化したので、11月7日10:00UTに地球捕捉モードに移行開始、同日12時19分UTに三軸姿勢を確立した。その際、地球センサの検知レベルを変更した。

10月28日NASAの地球科学ミッション・オフィスは、レベル5の磁気嵐予測に基づき、改良型高性能マイクロ波放射計 AMSR-E を搭載している AQUA に対し、安全状態にするよう指示を出した。JAXA は9時54分UTに上記の連絡を受け、AMSR-E は、10月29日15時58分UTに安全モード(スリープモード: マイクロ波受信機電源 OFF) にした。環境計測技術Gに相談があり、安全モードにするよう勧告した。また復帰時期も相談を受けた。復帰は11月6日に行った。

ADEOS-II に関しては、10月24日(UT)、太陽電池パドルからの発生電力が低下が16:12UTから始まり、16:13UTからの約3分間で、シャント電流1と2が、25Aから0Aに、電力制御回路への入力電流が1と2が28Aから10Aに低下した(発生電力換算で、約6kWから約1kWへの低下)。そのためバッテリーが放電し、テレコマ不通で運用を断念した。本運用異常に関する環境計測技術Gの支援活動については別途記載する(「環境計測技術グループのプロジェクト協力」参照)。

(3) 国内外の衛星障害及び運用管制上の太陽フレア対策の調査結果

一連の太陽フレア発生期間中に生じた衛星障害及び太陽フレアへの対策に関する調査結果(みどり2号(ADEOS-2)とこだま(DRTS)の2つの運用異常を除く)を別表1に示す。主な出典は下記のNOAAの報告書であるが、それ以外の出典は表の中に示した。

出典: Service Assessment "Intencse Space Weather Storms October 19-November 07, 2003", U.S. Dept. of Commerce, NOAA, March, 2004 (Draft)

出典には全般的な統計データとして、NASAのゴダード宇宙センターが運用管制している宇宙科学衛星(深宇宙探査も含む)の約59%がこの10月期の太陽フレアの影響を受け、耐宇宙環境設計をしていたにもかかわらず、約24%のミッション(衛星)は搭載機器の電源をOFFにするか、他の運用上の防衛対策をとったとの記載があった。別表1を源泉としたDRTSとADEOS-IIの障害を除いた障害の調査結果を表1に示す。

Table.1 国内外の衛星障害例及び太陽フレアの運用上の対策例(上記の2件を除く)

故障・不具合の区分	件数
永久故障または大幅に劣化	4
安全モードに移行、 または運用を一時的に停止したもの	37
データ内容の「誤り」が増えたもの、 または搭載コンピュータが誤動作したもの	8

(4) 太陽フレア警報システムの内容及び発信状況

太陽フレア警報システムは、NOAA-GOES-8号(現在運用休止中)、10号及び12号衛星のX線強度、陽子の個数を常時リアルタイムで計算機でモニタし、それら値が我々の過去の衛星障害研究のノウハウで決めた閾値(X線については $1 \times 10^{-4} \text{Watts/m}^2$ を超える場合、陽子については10MeV以上のフラックスが10pfu (proton flux unit = 個/cm²/sec/str) 以上となる現象が15分間以上連続した場合)を越すと計算機が警報メッセージを自動発信するシステムである。大きな太陽フレアが発生すると、X線は約8分19秒で静止衛星軌道に届き、これはGOESのX線センサで探知できる。太陽フレアの放射線粒子は荷電粒子のため、太陽磁場のアルキメデス螺旋に沿って飛来するのでフレアの発生場所により到達するまで約50分から数時間の幅で時間がかかる。このX線到着時間が早いことを利用して、太陽フレアに対するNowcast警報を発信する。内容については、X線イベント及び粒子(各エネルギーの陽子及び電子)イベントの発生日時、X線強度、粒子フラックスまた終了した場合の終了日時等を発信している。今回の一連の太陽フレアでは合計約40回の警報メッセージを発した。また2004年2月26日にも発信しており、現在まで約130回の警報メッセージを発信した。現在の配信組織は環境計測技術グループ以外のJAXA内部では、衛星運用技術部、宇宙医学室があり、JAXA外では以下(敬称略、順不同)のユーザがある。また運用管理者には携帯電話のメールアドレスにも発信をサービスしている。

- ・ 気象庁 気象衛星センター データ処理部
- ・ (株) JSAT (旧日本通信衛星株式会社) 横浜衛星管制センター
- ・ (株) 放送衛星システム
- ・ (独) 放射線医学総合研究所 宇宙放射線防護プロジェクト
- ・ (独) 情報通信研究機構 (NICT)

4. まとめ

観測史上最大級の太陽フレアが発生した期間における国内外の衛星障害及び運用管制上の太陽フレア対策に関する調査結果は今後の衛星設計、運用技術に貢献できる。また太陽フレア警報については、今回の太陽フレアを契機としてJAXA内外の衛星運用部門の方からの登録追加要求があり、特に外部機関からはその迅速性に関し好評であった。宇宙機の設計・運用技術と宇宙環境は密接な関係があり、今後も宇宙環境とその影響については、十分に注意し、モニタする必要がある。

別表 1

故障・不具合の区分	衛星名と故障・不具合の事象と日時
永久故障または大幅に劣化	<p>① 米国極軌道気象衛星 NOAA-17 の改良型マイクロ波観測装置 AMSU-A1 (Advanced Microwave Sounding Unit-A1) のスキャナーが永久故障した (10月27日)。</p> <p>② 米国気象衛星 GOES -8 号の X 線センサが OFF になり、復帰しなかった (10月27日)。</p> <p>③ ユーテルサット新通信衛星「e-bird」に不具合か。関係者の話によると、9月にアリアン5で打ち上げられた「e-bird」に深刻な不具合(注)が発生しているとのこと。不具合は同衛星に搭載されている20本のトランスポンダ全てに影響を与えており、最悪のシナリオには衛星の全損も含まれるとのこと。尚、ユーテルサット社は現在のところ、この件に関しコメントを出していない。国際課注：不具合種別など詳細は不明。SPACENEWS オンライン版 (11月7日)</p> <p>④ 火星周回中の探査機「マーズ・オデッセイ(Mars Odyssey)」の観測機器の放射線観測装置「Martian Radiation Environment Experiment(MARIE)」が、太陽活動の影響により10月28日から適切に作動しなくなっていることをNASA/JPLが明らかにした。復旧作業は今後も継続される。同探査機のその他の観測機器については順調に作動している。(11月26日、JPL Press Release)</p>
安全モードに移行、または運用を一時的に停止したものの(1/4)	<ul style="list-style-type: none"> ● 10月23日、太陽風観測衛星 GENESIS 衛星(L1定点)が安全モード(Safe mode)に入り、11月3日に復帰。 ● 10月24日、彗星探査機 STARDUST 衛星が、書き込み内容の誤動作(read errors)で安全モードに入り、復帰した。 ● 10月24日、X線天文衛星 CHANDRA 衛星が高レベルの放射線を受け(13:34UT)、観測を停止、10月25日に復帰した。 ● 10月24日、ISSではZ1トラス上に2機あるPCU(Plasma Contactor Units)の内、1台が起動された模様(10/22発生CME、10/23発生Xフレアによる対策)。出典：ISS On-Orbit Status 注：PCUは、ISSと宇宙空間の間での放電を避けるための機器(ISS本体やEVAクルーへのハザード回避のため)で、ISSの浮遊電位を±40V以下に保つために使用される。ちなみに40VはハザードレポートISS-EVA-312から来るものでクルーが電気ショックを受けないための電位差。 ISS MER (Mission Evaluation Room)によると、Environteams Team (たぶんSRAGと呼ばれる放射線環境を監視しているチーム)の要求で、10/23に発生したX-5クラスの太陽フレアの影響がISSにあるか否かを監視するため、PCUを起動しデータの取得を行おうとした模様で、特にISSに大きな影響があることを想定してPCUをONにしたわけではない。そのレポートにも、「無線通信には影響があるかもしれないが、10/23のフレアによるISSへの影響はない」と記述されていた。その後、10月28日のフレア、さらにデータ蓄積のため11月7日まで運用してデータを取った模様。 ● 10月24日、米国静止気象衛星 GOES -12 号の磁気トルカが、磁気嵐の擾乱を受け運用できなくなった。その後復帰。 ● 10月26日、月探査機 SMART-1 衛星が、9時23分(UT)、イオンエンジンが予定外の自動停止。原因は放射線レベルが上昇したためと見られる。次の予定着火時間には再スタートに成功。ここ2週間程、スターセンサも放射線の影響、温度上昇等により不調をきたしている。これは検出器のCCDに太陽フレアの陽子と重イオンの白い軌跡ノイズの'hot spots'ノイズを起こしているのが主原因。スターセンサの処理ソフトを修正して対応した。太陽電池発生電力は予測では1,850Wだったが、放射線劣化が予想より、1日に1-1.5Wと多く出ているが、10月20日以降にさらに急激な発生電力の劣化状態が続いている。これ

<p>安全モードに移行、または運用を一時的に停止したものの (2/4)</p>	<p>は太陽フレアの放射線劣化。(Last updated: 31 October 2003, 0100 UTC) (民間の衛星アノマリ・データベース (SAT-ND))</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 10月26日、SMART-1の上記の障害と同じ時刻に、ESAのXMM衛星とINTEGRAL衛星の2つの衛星の搭載放射線検出器に太陽フレアと見られる非常に多くの放射線を検知した。(SAT-ND) ● 10月26日、INTEGRAL衛星は、放射線上昇により安全モードに入った。(SAT-ND) ● 10月26日、X線天文衛星CHANDRA衛星が高レベルの放射線を受け、再び観測を自動的に停止、その後に復帰した。 ● 10月28日、ISSのクルーには"radiation contingency" (Flight Rule B14-7による)が通告された。クルーには放射線量の高い場所を通過する軌道パスの時間帯が通知され、放射線シールド効果の高い場所：ヴェズダ(SM)の後方と、デスティニ(USLab)のTeSS (Temporary Sleep Station: 2次中性子のシールド対策として5cm厚のポリエチレンで囲んだ個室)にいるよう指示された。(出典: ISS On-Orbit Status) ● 10月28日、NASAの地球科学ミッション・オフィスは、レベル5の磁気嵐予測に基づき、AQUA、LandSat、TERRA、TOMS、TRMMの5衛星に対し、安全状態にするよう指示を出した。 ● 10月28日19時54分UTに上記の連絡を受け、AQUA搭載の日本の改良型高性能マイクロ波放射計AMSR-Eは、10月29日15時58分UTに安全モード(スリープモード: マイクロ波受信機電源OFF)にした。環境計測Gに相談があり、安全モードにするよう勧告した。また復帰時期も相談を受けた。復帰は11月6日に行った。(JAXA) ● 10月28日TRMM衛星の軌道上メンテナンスが増えた ● ICESat衛星のGPSのリセットをした。 ● UARS衛星のHALOE機器のスイッチONは太陽活動のため延期した。 ● 10月28日、米国軍用気象衛星DMSP衛星F-16号に搭載した電子・イオン観測装置SSIES (Special Sensor for Ions and Electrons) でデータが一時取れなくなった。11月3日にもデータ欠損あり。改良型マイクロ波観測装置AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit-A1) の発信器が永久故障したので、冗長系に切り替えた。 ● 10月28日、太陽観測衛星SOHO衛星(L1定点)の搭載コロナ観測装置CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer) を、コマンドで安全モードに切り替えた。そのため新しい太陽フレアによるコロナ質量放出(CME)現象の検出が困難な状態。(10月28日から30日の3日間) ● 10月28日、火星探査機マーズ・オデッセイが安全モードに入った。また搭載した放射線観測装置MARIE (Martian Radiation Environment Experiment) の温度計で赤の異常警報となったので電源をOFFした。10月29日にダウンロード中にメモリエラーを生じたが、10月31日に再起動して修正した(cold reboot)。 ● 10月28日、科学衛星Microwave Anisotropy Probe衛星は、スタートラッカーがリセットされ、冗長系に切り替わった。その後主系に復帰。 ● 10月28日、赤外天文衛星SIRTF衛星は、高エネルギー陽子の到来に対し、科学ミッション機器の実験を停止し、地球指向モードにした。その後4日間運用を停止した。 ● 10月29日、科学衛星CHIPS衛星の搭載コンピュータがオフ・ラインになり、18時間、衛星とコンタクトが取れなくなった。コンタクトが取れた時、衛星の姿勢はタンブルしていた。オフライン後の27時間後に、復帰に成功した。 ● 10月30日、FedSatのデータが取れなくなった。理由は、極付近を通過中に磁場が大きく変化したため、磁気センサーが誤作動して姿勢が90度傾いたため。その後復帰した。 ● 10月28日-30日、先端型組成探査機ACE衛星と太陽風観測衛星WINDS衛星(L1定点)のプラズマ計測が停止した。 ● 10月28日-30日、米国静止気象衛星GOES衛星の電子計測値が飽和した。(これは大きなフレアでは毎回起こっている) ● 10月28日-30日、ISSは被害を受けやすいロボットアームも停止させた。 ● 10月29日、科学衛星X-ray Timing Explorer衛星は、搭載の放射線比例計数管(PCA)が高電圧を感知した。全天スカイ・モニタ装置は自動的にシャット
---	---

安全モードに移行、または運用を一時的に停止したものの
(3/4)

- ダウンした。10月30日に前述の2つの装置は復帰したが、PCAは再びシャットダウンした。PCAの再復帰は、11月に遅延する予定。
- 10月28日-30日、科学衛星GALEX衛星に搭載した2つの紫外線実験装置の検出器が高電圧に帯電したため、電源OFFにした。その検出器は11月過ぎまでOFFのままにする。
 - 10月28日-30日、プラズマ観測衛星POLAR衛星のデスパン・プラットフォームが3回ロックから外れた(out of lock)。しかし、3回とも自動的に復帰した。
 - 10月30日、ISSについて高エネルギーの太陽フレアにより、MSSはフライトルール(FR)に基づいて主系統がパワーダウンされ、冗長系のキープアライブ(KA)電力のみON状態にされることが要求された。しかし、FRではSSRMSとMBSの熱的な制約も規定しており、これの方が故障に直結するため優先されることになる。(すなわち、1系統のみのKAコンフィギュレーションでヒータが故障すれば、低温リミットを越え、損傷する可能性がある)このため、ISSが太陽プロトンの影響を受けない期間は2系統でKA電力を供給し、放射線レベルが高いエリアを周回する期間は1系統でKA電力を供給することになった。
(出典：ISS On-Orbit Status)
 - 10月30日、太陽活動の活発化により、ISSが受ける抵抗も増大し、軌道の降下量が増加している。10/30は1日で150m高度が低下。1週間前は95m/dayだったため、1.5倍に増大している。(出典：ISS On-Orbit Status)
 - 中国宇宙環境予測センターによると、太陽フレアの影響により、“神舟”五号軌道衛星は飛行高度著しく低下している。専門家によると、現在、軌道衛星運行状況が正常で、関係機関が動力装置起動し飛行高度を上げることを検討している。(中新网10月29日「CCTV国際」)
 - 11月2日、X線天文衛星CHANDRA衛星が高レベルの放射線を受け、再び観測を自動的に停止、観測再開は数日間遅れる予定。
 - 11月4日、欧州宇宙機関(ESA)は月探査機スマート1(SMART-1)のステータスを発表し、同探査機がこれまでにイオンエンジンが8回自動停止したことを明らかにした。ESAは原因を調査中だが、ほとんどが遠地点付近を通過中に起こっており、太陽活動による放射線が電子ユニットに影響を与えたものと考えられている。また、太陽活動の影響でメインコンピュータが数回リセットされ、バックアップコンピュータに切り替えられたり、スタートラッカー(恒星センサ)の光学ヘッド部分の温度が上昇するなどの異常があった。スマート1は現在78周目の地球周回軌道を周回中で、イオンエンジンは合計380時間以上燃焼を続け、約6kgのキセノン燃料を消費した。
 - 11月6日、POLAR衛星の搭載機器TIDE(Thermal Ion Dynamics Experiment)がリセットし、高電圧電源が供給不能になった。しかし、24時間以内に復帰した。
 - 11月6日、火星探査機マーズ・オデッセイが安全モードから復帰した。
 - 12月9日、ESA、SMART-1運用に変更、放射線に対処
ESAは11月28日頃から、太陽フレアに伴う放射線環境の悪化に対処するため、月探査機「スマート1(SMART-1)」の運用手法等に一連の変更を加えた。同機はイオン推進で加速中であるが、シングルイベントアップセット(SEU)を原因とするエンジン停止がこれまで3回発生している事に加え、太陽電池パネルの発電能力の低下が進んでいる。
- 主な変更点
- ・SEUに伴う燃焼停止を検知し、自動的にエンジンを再着火するようプログラムを変更
 - ・高度10,000km以下での燃焼を中止
 - ・エンジンの噴射方向を変更(放射線帯からの離脱が早まる見通し)
- 12月16日、ESAは月探査機「スマート1(SMART-1)」の運用状況を発表。同機は放射線環境の悪化に伴う問題を順調に克服して運用
 - ・放射線の影響によるエンジン停止時に自動的に再着火するようソフトウェアに変更を加えたため、高度10,000km以下での燃焼を再開し、継続的に運転している。

安全モードに移行、または運用を一時的に停止したものの(4/4)	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線の影響による太陽電池パネルの劣化がほぼ止まった。高度上昇に伴い発生電力は増大している。 ・主コンピュータとスタートラッカの間で時折ずれが発生する。現在原因を調査中。 ・スタートラッカの光学部分の温度が上昇している。太陽光で装置の内部が暖められたことが原因と判明した。 ・イオンエンジンの運転時間が延べ1,000時間を超えた。
データ内容の「誤り」が増えたもの、または搭載コンピュータが誤動作したもの	<ol style="list-style-type: none"> ① 米国静止気象衛星 GOES -9号と GOES-10号で、高い発生確率のシングルイベントによるビット反転 (SEU:Single Event Upset) を生じた (10月24日)。 ② 太陽観測衛星 RHESSI 衛星は、搭載コンピュータが自然に停止した (10月25日)。 ③ 太陽観測衛星 RHESSI 衛星が搭載コンピュータの一時停止と回復 (reset) が2回あった (17:40、03:32) (10月28日)。 ④ 科学衛星 CLUSTER 衛星4機のうち、いくつかは、搭載プロセッサがリセットされたが、復帰した (10月28日-30日)。 ⑤ GEOTAL 衛星で多くの SEU を発見、スピン衛星なので、本来的に安全・モードとなっているので静観中 (10月29日)。(JAXA) ⑥ 火星探査機 MARS ODYSSEY が、ダウンロード中に多くのメモリ誤りを検出した (10月28日)。地上からの Cold Reboot で誤動作をリセットした (10月31日) ⑦ 豪州 FedSat 衛星が、多くの SEU を観測した (10月30日 15:30UT) (JAXA) ⑧ μ LabSat-1 衛星で、通常の約4倍~6倍の発生頻度の SEU を発見 (10月30日)。(JAXA)

(参考) 航空機や地上の障害例

- ① 10月24日、北極領域を通る航空機は、航路ルートを変更した。理由は磁気嵐による HF/VHF 帯の通信障害回避のため。
- ② 10月28日-30日、FAA は、初めて 25kfeet 以上の高度を飛行する航空機乗客が受ける放射線障害警報を発令した。(1989年9月29-30日の歴史的太陽フレアでは、コンコルドのみに警報が出た)
- ③ 10月30日、スウェーデンの Malmo で電力送電線の障害があった。
- ④ 10月28日-30日、ニューヨークとウィスコンシンで電力送電線に高電流が流れた。
- ⑤ 10月28日-30日、航空機の北緯57度以上の航路ルートを禁止したので、航路変更した。いくつかの米国航空の路線はルート変更した。英国の大西洋航路は南に航路変更した。
- ⑥ 10月30日、高緯度(主に北極圏)を航行中の航空機の無線に異常が報告されているが、この空域の民間機を管制する Nav Canada では、「影響は全般的に航空管制上問題のない範囲」と述べている。
- ⑦ 10月28日-30日、CONUS の WAAS サービスは中断された。高緯度地方の GPS レシーバは停電した。
- ⑧ 10月28日-30日、軍用通信 HF/UHF SATCOM, OTH, などが障害を受けた。
- ⑨ 10月28日-30日、ニューファウンドランド島の Loran C システムが磁気嵐の干渉を受けた。