

衛星高度異常低下時の宇宙天気

玉置 晋（合同会社いばらき宇宙天気研究所／茨城大学研究・産学官連携機構）

1. はじめに

太陽活動極大期に地磁気嵐が発生すると、地球低軌道（LEO: Low Earth Orbit）で大気ドラッグ（抵抗）が増大する。LEO 衛星は大気の壁にぶつかり、姿勢擾乱を発生させたり、進行速度が失われることにより高度が異常に低下したりして、予測軌道と実際の軌道の乖離が大きくなる。結果として、地上局アンテナで衛星電波を捕捉できなかったり、LEO 衛星から高精度で地球を観測するための軌道保持範囲が維持できなくなったりする。また、大気ドラッグは宇宙ゴミの衝突予測や衛星の大気圏再突入の不確定要素でもある。大気ドラッグの増大による衛星高度異常低下時の宇宙天気とその警戒指標を知ることは、衛星運用者や、今後誕生する民間の宇宙天気予報士にとって必要不可欠である。

2. 宇宙天気が低軌道衛星運用に与える影響

1988 年に「宇宙天気予報[®]」が茨城県那珂湊市（現 ひたちなか市）の郵政省通信総合研究所 平磯支所で生まれてから間もなく 40 年が経過しようとしている。2022 年に総務省主催「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」が開催され、報告書¹⁾には民間の宇宙天気予報士の実現が盛り込まれるなど、宇宙天気の研究領域の社会実装に向けた動きが加速している。



図 1 ひたちなか海浜鉄道 美乃浜学園駅に設置されている記念プレート
(撮影：いばらき宇宙天気研究所 石田彩貴)

情報通信研究機構は、宇宙天気の社会影響を考慮した新しい宇宙天気予報の基準を策定し、2025 年 6 月から新警報基準に基づく宇宙天気イベント通報「SAFIR: Space Weather Alert For social Impacts and Risks」の配信を開始した。この中で、宇宙システム運用分野では、シングルイベント対策に静止軌道で観測されたプロトン粒子フラックスを、静止衛星の帯電・放電対策に高エネルギー電子フラックスの 24 時間積分値（フルエンス）を警報基準として採用している。

宇宙天気が LEO 衛星運用に与える影響には 3 つあると考える。一つ目は太陽高エネルギー粒子によるシングルイベント、二つ目はプラズマバブルによるコマンド・テレメトリの伝搬障害、三つ目は太陽極端紫外線の増加や地磁気嵐による熱圏への熱入力を起因とする大気ドラッグ（抵抗）の増加がある（図 2 参照）。SAFIR ではプラズマバブル、大気ドラッグに対する警報が未実装である。本論文は、衛星運用者や民間の宇宙天気予報士が、大気ドラッグの増加を警戒する際に目安として活用できる宇宙天気情報の指標を生み出すことを目的としている。

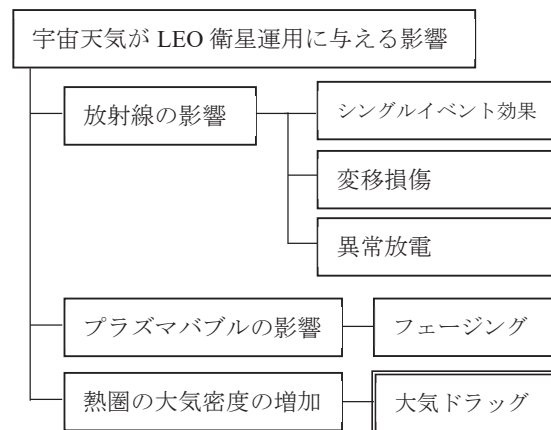


図 2 宇宙天気が LEO 衛星運用に与える影響

3. 2000 年 7 月の ASCA とバスター・イベント

大気ドラッグの増加の原因による衛星障害で有名なのは日本の X 線天文衛星 ASCA: Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) の事例である。2000 年 7 月 15 日は平均高度 469.3km(近地点高度 449.6km, 遠地点高度 485.9km, 軌道離心率 0.039) の LEO を飛行していた。22:30-23:20 に大気ドラッグが増大し、ASCA は姿勢を保持する為に自動的に安全対比モードに移行した。しかしながら、深刻な姿勢擾乱は、太陽電池への日射量を減少させ、蓄電池の電力を使い切り、運用を断念した²⁾。この衛星障害の原因となった大気ドラッグの増加は、バスター・イベントと呼ばれる極端宇宙天気現象の間に発生した。イベント名称はフランス革命のきっかけとなったバスター・牢獄襲撃の日が 7 月 14 日であったことに由来する。大気ドラッグの増加の要因として、高層大気への 2 つの熱入力があるといわれている。一つ目は、長期的な太陽極端紫外線の増加、二つ目は突発的なオーロラ嵐(地磁気嵐)である(図 4 参照)。

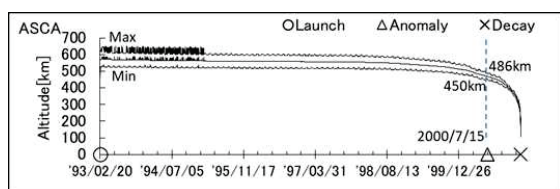


図 3 ASCA の高度 打ち上げからの長期傾向

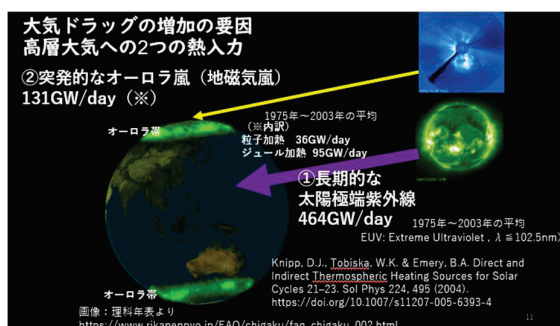


図 4 大気ドラッグの増加の要因

太陽極端紫外線のプロキシで、太陽活動の活発さを示す F10.7 の長期傾向を図 5 に示す。太陽活動は約 11 年毎に極大期を迎える。2000 年 7 月のバスター・イベントは第 23 太陽活動サイクル(1996 年 5 月～2008 年 12 月)の極大期に発生した。バスター・イベントは 2000 年 7 月 14 日から 7 月 17 日にかけて発生した大規模太陽フレアと極端地磁気嵐を指す。

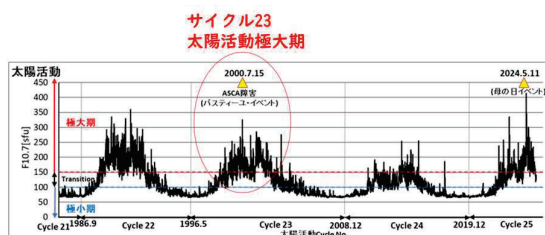


図 5 太陽活動の活発さを示す F10.7 の長期傾向

2000 年 7 月 11 日に太陽面の東側リムに出現した活動領域 9077 で X1.0 クラスの大規模太陽フレアが発生した。これに伴うコロナ質量放出(CME: Coronal Mass Ejection)の端が地球磁気圏をかすめて以降、弱い地磁気活動が継続した。太陽自転で太陽面中央まで移動してきた活動領域 9077 は、7 月 14 日に X5.8 クラス(後に X8.1 クラスに上方修正された)の大規模太陽フレアを引き起こし、CME を地球方向に放出した。この CME は 7 月 15 日に地球磁気圏に到達した。

地磁気嵐を引き起こす赤道環電流のプロキシで地磁気活動の活発さを示す Dst 指数を図 6 に示す Dst 指数は負に振れるほど、強い地磁気嵐が発生していることを示す。図中に ASCA で姿勢異常が発生した時間(22:30-23:20)を矢印で示す。この時間帯において、Dst 指数は-300nT を下回る、非常にシビアな地磁気嵐が発生しており、熱圏に大きな熱入力があったと推定される。

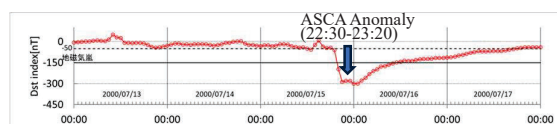


図 6 地磁気活動の活発さを示す Dst 指数

4. 大気ドラッグの指標：衛星が落ちる境界高度

図 7 は宇宙工学の教科書に出てくる大気ドラッグの式である。例えば文献 3) を参照するとよい。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D (V_s - U)^2 A_r$$

大気ドラッグ (Drag Force)
大気密度
衛星速度
大気風速
衛星と大気の衝突断面積

効力係数
Drag Coefficient

図 7 大気ドラッグの式

この式のとおりに大気ドラッグを直接求める為には、衛星個々の特性値である効力係数や衛星と大気の衝

突断面積が必要になるが、これらを知るのは容易ではない。高層大気の大気密度の連続観測データも残念ながら存在しない。経験的大気モデルから得られる大気密度だけが頼りである。図 8 に NRLMSISE-00 と呼ばれる経験的大気モデルから求めた北極上空地方時 0 時の大気密度 (高度 400km、500km、600km、700km) を示す。これらの高度の大気密度は太陽活動極大期には増加し、極小期には減少する。また、強い地磁気嵐が発生した場合には、突発的に増加する。定性的には、太陽活動極大期にシビアな地磁気嵐が発生した場合に大気密度が最も増加する。

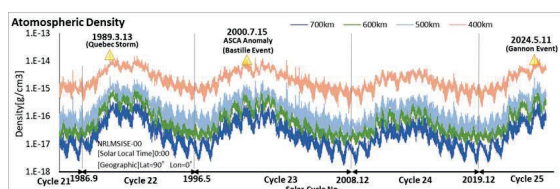


図 8 経験的大気モデル (NRLMSISE-00) に基づく北極上空の大気密度

図 9(a)に ASCA 衛星の 5 日間あたりの平均高度を示す。図 9(b)に高度低下量を示す。ここで高度低下量とは(a)に示す 5 日間あたりの平均高度の日毎の変化量としている。1995 年 2 月 21 日に最後の軌道制御のあと、4 期のライフステージを定義する。

- ①安定期：高度低下量 $\sim 100\text{m/day}$
- ②遷移期：高度低下量 $100\text{m/day} \sim 500\text{m/day}$
- ③不安定期：高度低下量 $500\text{m/day} \sim 2000\text{m/day}$
- ④再突入期：高度低下量 $2000\text{m/day} \sim$

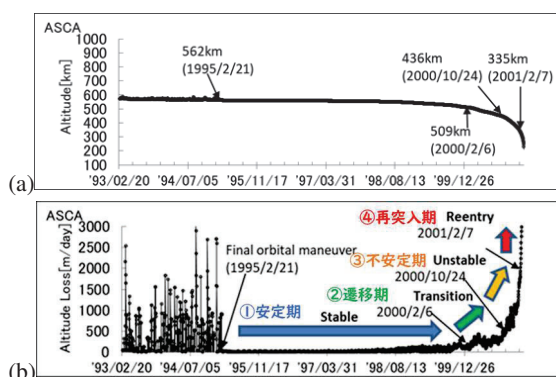


図 9 ASCA 衛星の(a)高度と(b)高度低下量からみる LEO 衛星のライフステージ

高度低下量が 100m/day 以上となる遷移期において、衛星は急激に落ち始める。この高度を安定境界と定義する。ASCA の場合は、2000 年 2 月 6 日に遷移期

に移行し、同年 7 月にバステュー・イベントに遭遇した。

5. バステュー・イベントより苛酷な 2024 年 5 月母の日イベントの大気ドラッグ環境

ASCA が安定境界高度に達した時の大気密度が他の任意の日において、どの程度の高度にあったかを大気モデル NRLMSISE-00 に基づき出力した。ASCA の安定境界高度の長期傾向を図 10 に示す。ASCA で障害が発生した 2000 年 7 月 15 日 (バステュー・イベントの期間中) の安定境界高度は 573km だった。安定境界高度がこれを上回る事は、大気ドラッグ環境でみて、バステュー・イベントより苛酷な宇宙環境だったといえる。これ以降で、バステュー・イベントを超える安定境界高度になったのは 9 イベントある。いずれも、太陽活動極大期に CME が地球磁気圏に衝突し、地磁気嵐が発生している。その一つである、日本でもオーロラがみえた 2024 年 5 月 11 日 (2024 年 5 月母の日イベント) は高度 626km だった。さらにシビアな環境はカナダのケベック州で地磁気誘導電流による大停電が起きたことで有名な 1989 年 3 月 13 日 (ケベック・ストーム) だけである。

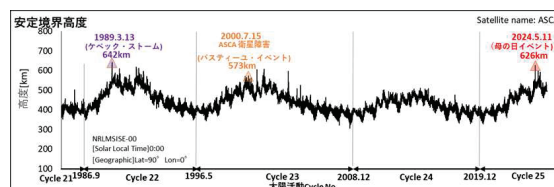


図 10 ASCA の安定境界高度の長期傾向

6. 苛酷な大気ドラッグ環境を生み出す条件

図 11 に太陽活動の活発さを示す F10.7 と安定層境界高度の関係を示す。F10.7 は太陽活動が活発であるほど値が大きくなる。図より F10.7 が大きくなるほど、安定境界高度が上昇していることがわかる。F10.7 が 100sfu (sfu: solar flux unit)未満の時を太陽活動極小期、 150sfu を上回る時を太陽活動極大期とする。太陽活動極小期の安定境界の平均高度は 402km だった。太陽活動極大期の平均高度は 509km であり、極小期と比べて約 100km 上昇する。

次に地磁気活動の活発さを示す Dst 指数は、地磁気活動が活発であるほど値が小さくなる。Dst 指数が -50nT を上回る場合を静穏 (図中の灰色プロット)、 -150nT を下回る場合 (強い地磁気嵐に相当) を擾乱 (図中の黒色プロット) とした場合、静穏時の安定境

界の平均同土は 402km であったのに対して擾乱時には 534km で約 100km 上昇する。

苛酷な大気ドラッグ環境を生み出す宇宙天気の状態は定性的には

- ・ 条件 1 : 太陽活動極大期
- ・ 条件 2 : CME の地球磁気圏への衝突
- ・ 条件 3 : 地磁気嵐の発生

である。では、どの程度の地磁気嵐が発生するとシビアな大気ドラッグ環境となるのだろうか。

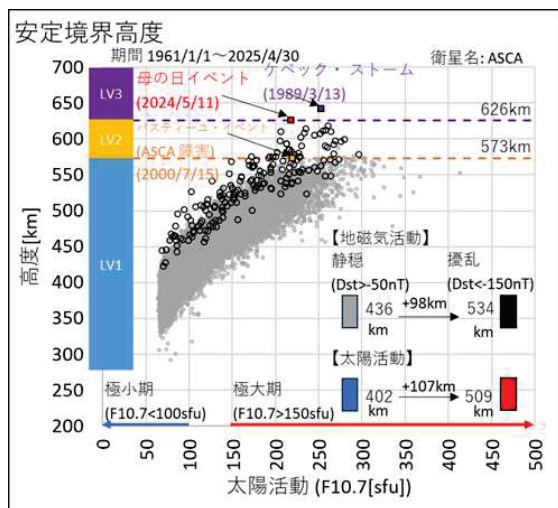


図 11 太陽活動と安定境界高度の関係

7. 大気ドラッグ警戒の為の宇宙天気警戒指標

宇宙天気予報士や衛星運用者が大気ドラッグを警戒する為には、安定境界高度ではなく、準リアルタイムでデータが公開される F10.7 や Dst 指数に落とし込む必要がある。図 12 に太陽活動極大期における地磁気活動の活発さを示す Dst 指数と安定境界高度の関係を示す。図より Dst 指数が小さくなるほど (負の向きに大きくなるほど) 安定境界高度が上昇する。バスター・ユ・イベントにおける安定境界をコーションリミット (注意) とした場合、強い地磁気嵐 (Dst 指数が -150nT 以下) において 20% を超える。

地磁気嵐の規模

- ・ 静穏 (Dst > -50nT) : 0.2%
- ・ 弱い (-50nT ≥ Dst > -100nT) : 1%
- ・ やや強い (100nT ≥ Dst > -150nT) : 8%
- Dst = -150nT -----
- ・ 強い (-150nT ≥ Dst > -200nT) : 22%
- ・ 非常に強い (-200nT ≥ Dst > -250nT) : 26%
- ・ 猛烈に強い (-250nT ≥ Dst > -300nT) : 57%

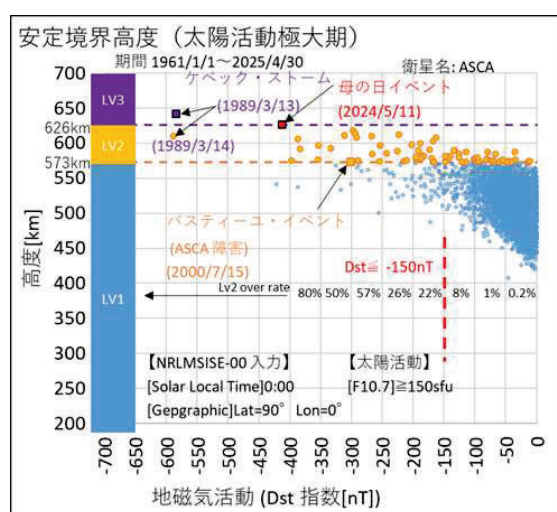


図 12 地磁気活動と安定境界高度の関係

このことから、苛酷な大気ドラッグ環境を生み出す宇宙天気の条件は、

- ・ 条件 1 : $F10.7 > 150sfu$ の太陽活動極大期
- ・ 条件 2 : CME の地球磁気圏への衝突
- ・ 条件 3 : $Dst \text{ 指数} \leq -150nT$ の地磁気嵐

と定量的に書き換えることができる。

衛星運用者や民間の宇宙天気予報士が、大気ドラッグの増加を警戒する際に目安として活用できる宇宙天気情報の指標として、上記を提案する。

参考文献

- 1) 総務省. 宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会報告書.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000821254.pdf, 2022. (accessed 2024-08-25).
- 2) 上出洋介. 太陽と地球の不思議な関係. 絶対君主と無力なしもべ. 講談社, 2011, 294p., (ブルーバックス, B-1713), ISBN978-4-06-257713-7.
- 3) 藤原 均. 宇宙機に働く大気ドラッグの評価について～高精度な宇宙機運用に向けて～. https://sw-forum.nict.go.jp/pdf/forum_3_140320.pdf, 2014. (accessed 2024-08-25)