



商用低軌道衛星時代における宇宙放射線環境と信頼性設計の影響 — 実測データをもとに！ —

松本 晴久 / 宇宙航空研究開発機構

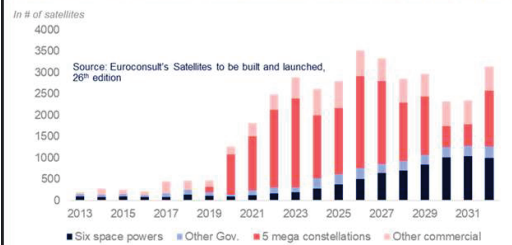
2025年8月6日

第19回 宇宙環境シンポジウム 五島育英会ビル8階

LEO衛星の拡大と放射線リスクの再確認



A forecast of 28,700 satellites for a total market of \$588 billion over the next 10 years



COTS利用の設計最適化が鍵

- ・衛星の数 最終的に数万基
- ・短い寿命 2～5年
- ・継続的な改善
- ・GEO衛星の統合
- ・業界市場動向
- ・手ごろな価格と顧客満足度

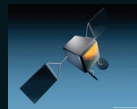
Euroconsultの衛星市場報告（2023）によれば、2023年から2032年の間に、年間平均2,800基以上の衛星（1日あたり8基、総質量4トンに相当）が打ち上げられると予測されている。

https://satellitemarkets.com/market-trends/four-tons-satellites-be-launched-daily-2032?utm_source=chatgpt.com

主なブロードバンドコンステレーション



名称	主なサービス	衛星	軌道高度と傾斜角	衛星間リンク	状況
Starlink(SpaceX)	個人および企業向けブロードバンドインターネット	承認済み約12,000基(提案42,000基)軌道上約7000基	高度540~570km, LEO:多重殻(傾斜角:53度, 43度, 70度, 97.6度)	あり(光レーザーリンク)	運用中(2020年からグローバルベータ版, 拡大中)
OneWeb(ユーテルサット OneWeb)	エンタープライズ/バックホールブロードバンドインターネット	648基の衛星(第1世代):打ち上げられた衛星は約618基	約1,200km LEO:近極軌道(約86°87度)	なし	運用中(2023年にグローバルカバーレッジを達成)
Amazon Kuiper(アマゾンカイパー)	個人および企業向けブロードバンドインターネット	3,236基の衛星(FCC承認)	高度590, 610, 630km LEO, 軌道傾斜角33度, 42度, 51.9度	計画中(プロトタイプで100Gpsでテストされた光ISL)	配備中(プロトタイプ打ち上げ2023年, 最初の運用打ち上げ2025年)
テレサイト・ライトスピード	企業/政府向けブロードバンド(キャリアグレード)	198基の衛星(298基から修正)	約1,000kmのLEO:極軌道と傾斜軌道(地球全体)	あり(光ISL, 高度なネットワークルーティング)	開発中(2023年に基金調達確保, 2026年か発売)



宇宙天気による主な影響事例 —Starlink/OneWeb/Kuiper—



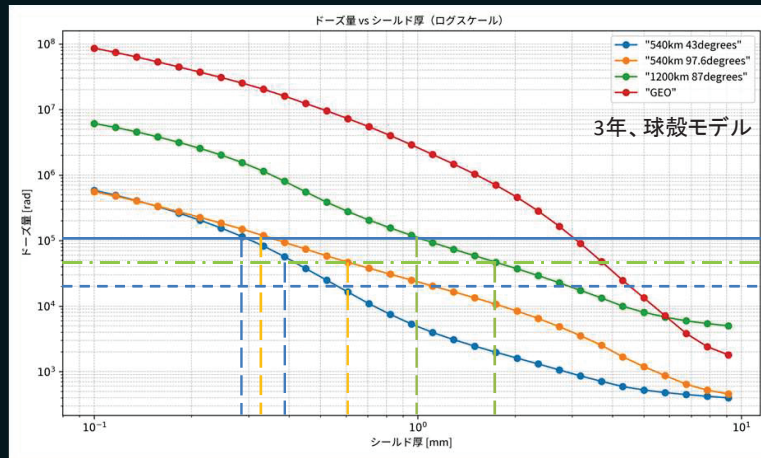
- 2022年2月、starlink衛星49基打ち上げ->38基が失われた

1月末に発生したCMEが2月初旬に地球に到達。G1級磁気嵐(‘Termination Event’)を引き起こし、上層大気の膨張により高度約130kmで衛星が予期以上の空気抵抗を受け、軌道維持ができずに再突入。過去の打ち上げに対して約50%増加した。損害1億ドル。
- 2024年5月 G5磁気嵐

北米~グリーンランドでオーロラを伴うレベル5の磁気嵐発生。Starlinkサービスにも通信品質の低下や一部端末の運用に影響を与えた(回線制御系やソフト面での不具合:SEUの加可能性あり)。イーロン・マスクCEO、依然として持ちこたえているとXに投稿。
12基の軌道低下とその後再突入した。arXiv:2410.16254
- OneWeb/Amazon Kuiper

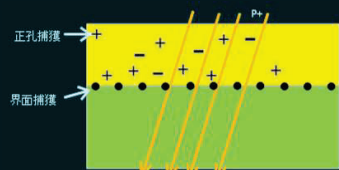
宇宙天気が原因とされる被害の公的報告は現時点ではない。OneWebなどは高い高度での運用のため、大気抵抗の影響は、starlinkほどは小さくなく、Kuiperもまだ実運用前で実際の障害事例は報告されていない。

低軌道衛星のドーズ量



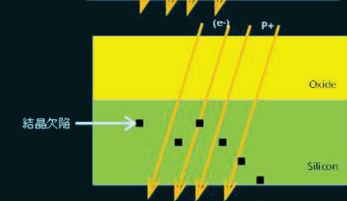
“LEO=安全?”, 設計寿命延長など

放射線が電子部品に与える影響



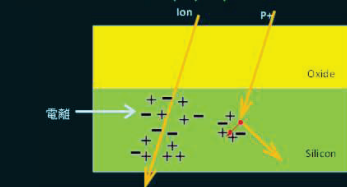
トータルドーズ効果 (TID)

- ・陽子、電子の入射により発生
- ・電磁放射線でも発生
- ・放射線の入射により発生した電子正孔対が悪影響を及ぼす。⇒出力劣化、寿命短縮



変位損傷効果 (DDD)

- ・主に陽子、高エネルギー電子及び中性子の入射により発生
- ・結晶構造自体を壊すため、特性に影響を及ぼす場合がある。⇒漏れ電流の増加、ゲイン低下、動作不良



シングルイベント効果 (SEE)

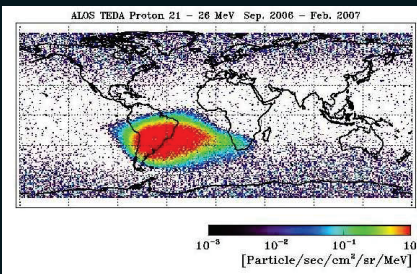
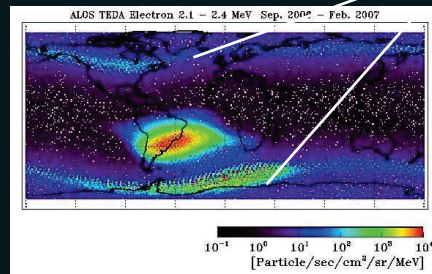
- ・重イオン、陽子の入射により発生、メカニズムは異なる。
- ・陽子は2次イオンの発生が影響
- ・中性子の入射でも発生⇒ビット反転・誤りデータ生成
- Latch-up ⇒過電流、永久故障

短期・長期で変動するLEOの放射線環境

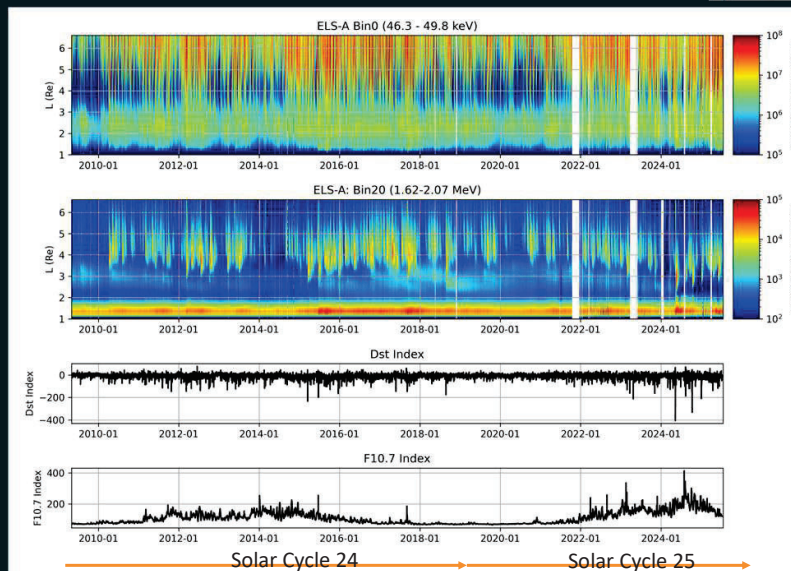


分類	原因	変動スケール	主な影響
太陽宇宙線	太陽フレア/CME	短期(分～数日)	SEU、機器の誤動作、SAP劣化
磁気嵐	CME/太陽風	短期(時間～数日)	表面帯電、放電、抗力、通信障害
放射線帯	構造(SAA, 電子角)	短期(10分～時)	SEU, 表面帯電、放電
GCR	太陽活動サイクル	長期(11年周期)	SEU
大気密度	太陽活動サイクル	長期(11年周期)	捕捉陽子、抗力

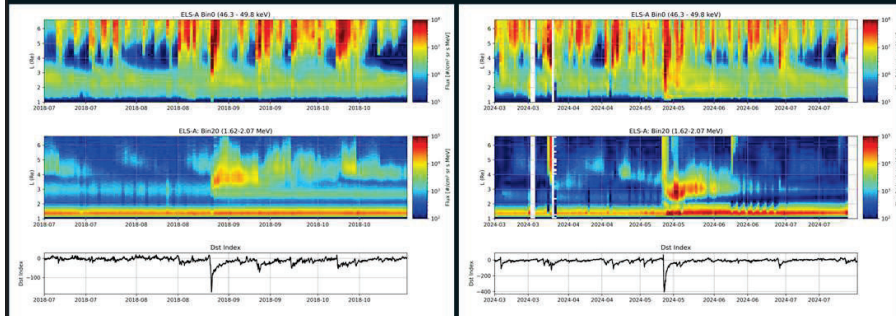
電子“角”



GOSAT 電子の変動グラフ（長期）



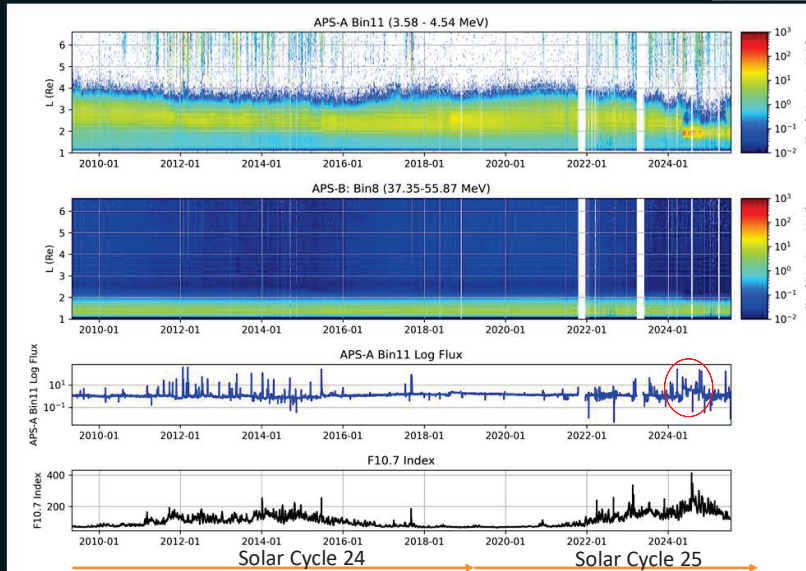
GOSAT 電子の変動グラフ（短期）



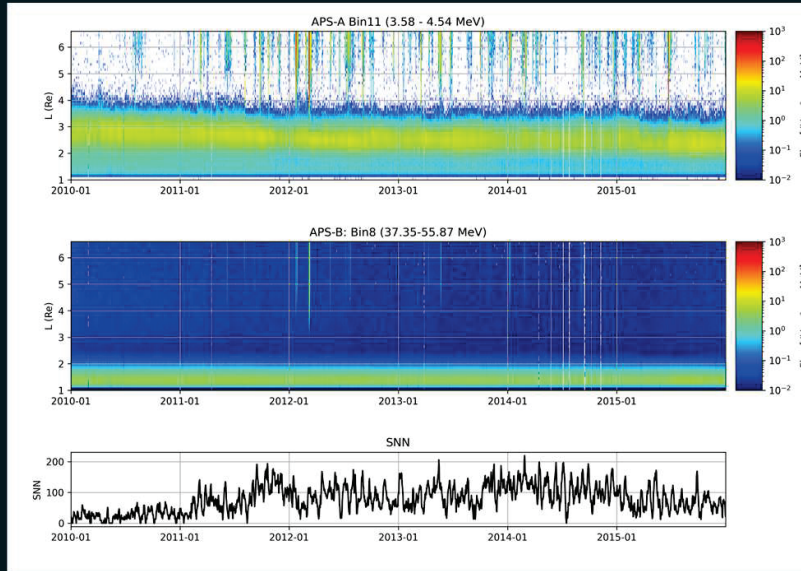
2018年8月25～26日
G3レベルの中強度磁気嵐
上段 46.3～49.8 keV
下段 1.62～2.07 MeV

2024年5月10～11日
G5レベルの強磁気嵐、全地球的影
響を伴ったイベント
上段 46.3～49.8 keV
下段 1.62～2.07 MeV

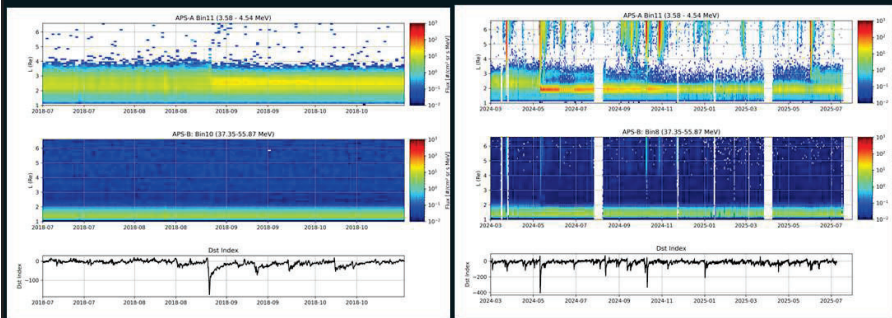
GOSAT 陽子の変動グラフ（長期）



GOSAT 陽子の変動グラフ (太陽フレア)



GOSAT 陽子の変動グラフ (磁気嵐)



2018年8月25～26日
G3レベルの中強度磁気嵐

2024年5月10～11日
G5レベルの強磁気嵐、全地球的影
響を伴ったイベント

COTS利用とリスクのバランス



要素	メリット	デメリット
コスト	商用量産⇒低価格	放射線耐性が不明
入手性	すぐに調達可能	突然の製造中止
性能	最新技術が使える	信頼性にばらつきあり



- ・COTSの限界
- ・TID/SEE試験実施が信頼性確保に不可欠

宇宙におけるCOTS利用 ーソフト冗長構成とエラー緩和戦略ー



ソフト冗長構成 (例)

- ・SWIFT-R / DWC: 命令・プロセス複製で誤り検出
- ・Watchdog Timer: 異常時に自動リセット
- ・制御フロー検査: 異常経路を排除

アプリケーション層 → SWIFT-R, DWC

ソフト制御層・OS → 再実行, Watchdog

ハード抽象層 → ECC, Scrubbing

ハード構造層 → TMR, DICE, Lockstep

エラー緩和戦略

- ・空間冗長: TMR, Lockstep
- ・情報冗長: ECC, CRC
- ・時間冗長: Scrubbing, 再実行
- ・構造対策: DICE, SOI

COTSでも、ソフト冗長+エラー緩和戦略を適切に組み合わせることで
宇宙利用における信頼性を大きく高めることができる。

まとめ



- 近年、商用LEO衛星や小型衛星の活用が急増し、使用部品として放射線環境の影響を受けやすいCOTS部品が一般的となっている。
- LEOではSAA及び外帯の角、短期的な太陽フレア・磁気嵐などによる放射線変動が無視できない。
- 実測データから、磁気嵐などにより急激なFlux上昇が確認されており、衛星運用時において考慮する必要がある。
- StarlinkなどはCOTS部品の特徴を効果的に取り込んでいるが、コストと信頼性のトレードオフをどうバランスするかが重要である。
- ハード冗長よりも、ソフト冗長（再起動設計、ECC、監視機能）などの戦略的実装が今後の鍵となる。
- 今後、最新の観測結果を設計条件に反映すると共に、運用においては、リアルタイムの宇宙天気モニタリングや、LEO環境モデルの精緻化が重要になると考える。

「LEOでも、放射線は“見える化”と“備え”が不可欠