

Application Note

重イオン軌道環境単一事象効果の推定



概要

このドキュメントでは、軌道上のシングル イベント効果 (SEE) イベントレートの計算に使用される方法について説明します。

目次

1 はじめに.....	2
2 参考資料.....	4
3 改訂履歴.....	5

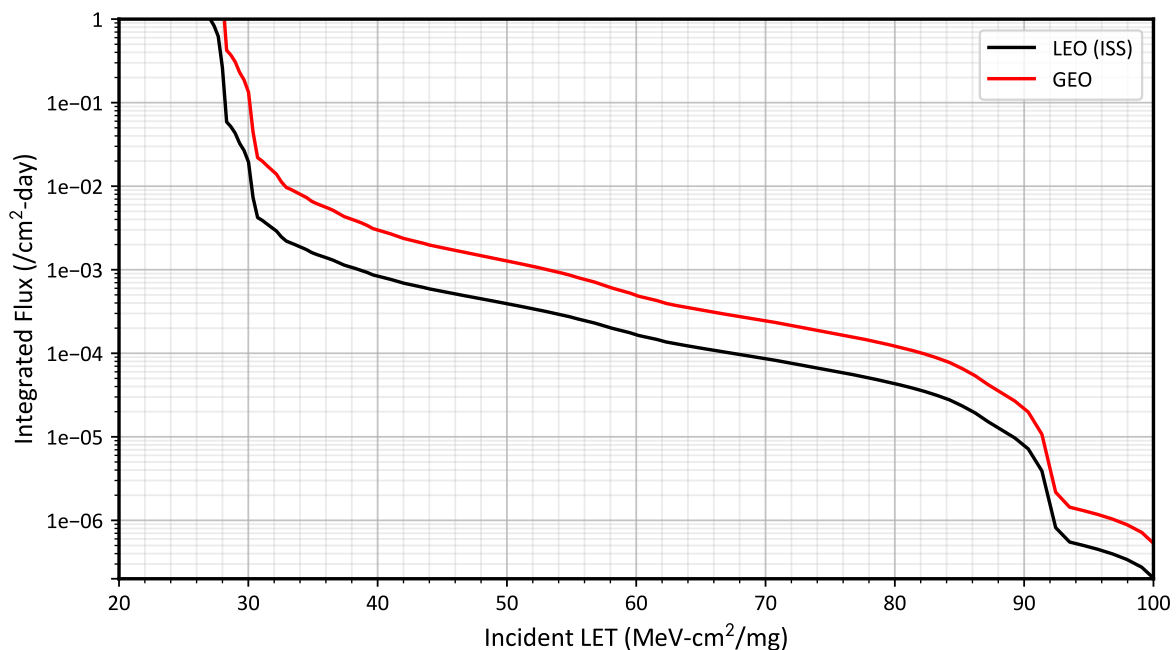
図の一覧

図 1-1. 最悪の週と 100mil (2.54mm) のアルミニウム遮蔽を仮定した CREME96 によって計算された、LEO-ISS (黒線) と GEO (赤線) 環境における積分粒子流量と入射 LET の関係.....	2
図 1-2. デバイスの断面と入射 LET の関係。ワイブル近似 (黒) が正方形近似 (赤破線) によってどのように「簡略化」されているかを示しています。.....	3

1 はじめに

SEE 軌道上イベント率を計算するには、デバイスの SEE 断面積と特定の軌道で遭遇する粒子のフラックスの両方が必要です。デバイス SEE 断面は通常実験的に決定され、軌道上の粒子のフラックスは経験的データに基づいて様々なソフトウェア アルゴリズムを用いて計算されます。代表的な事象発生率を生成する目的で、低地球軌道 (LEO) の例と静止地球軌道の例 (GEO) を Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics 96 (CREME96) を用いて計算しました。これらの軌道速度は、多数の電子機器間でイベント速度の計算を比較するための指標として使用されるため、国際宇宙ステーション (ISS) で見られる全方向のフラックスに直接適用することはできないことに注意してください。CREME96 コードは、地球近傍軌道上の放射線環境の推定を可能にするプログラム群です^[1, 2]。CREME96 は、航空宇宙業界で利用可能ないくつかのツールの 1 つで、正確な宇宙環境計算を提供します。導入以来、CREME モデルは軌道上のデータと比較され、精度が実証されてきました。特に、CREME96 には、フラックスが短時間で数桁増加する可能性がある現実的な「最悪の場合」太陽粒子イベントモデルが組み込まれています。

保守的なイベント率を生み出すために、最悪週モデル(過去 45 年間で 1 週間に及ぶ最大の太陽光イベントに基づく)が選択されました。この事象は 99% の信頼水準で最悪の事象に相当するとされています^[3, 4]。統合された磁束には、太陽と銀河の源からの重イオンへの陽子が含まれています。100mil (2.54mm) のアルミニウムでは、最小限のシールド構成を想定しています。LEO にある国際宇宙ステーション (ISS) と GEO 環境の 2 つの軌道環境が推定された。図 1-1 に、これら 2 つの環境における積分されたフラックス (高入射 LET から低エネルギー) を示します。Y 軸は、高い LET から低い LET まで積分された磁束を表しています。特定の LET 値における積分フラックスの値は、実際には、その特定の LET 値におけるすべてのイオン イベントをそれより高いすべての LET に積分したものです。これらの軌道速度は、30MeV 未満のイベントレートの計算が過大評価される可能性があるため、30MeV を超える LET に最も適しています。



Y 軸は、高い LET から低い LET まで積分された磁束を表しています。特定の LET 値における積分フラックスの値は、実際には、その特定の LET 値におけるすべてのイオン イベントをそれより高いすべての LET に積分したものです。これらの軌道速度は、30MeV 未満のイベントレートの計算が過大評価される可能性があるため、30MeV を超える LET に最も適しています。

図 1-1. 最悪の週と 100mil (2.54mm) のアルミニウム遮蔽を仮定した CREME96 によって計算された、LEO-ISS (黒線) と GEO (赤線) 環境における積分粒子流量と入射 LET の関係

図 1-1 は、CREME96 を使用して最悪の週と 100mil (2.54mm) のアルミニウム遮蔽を仮定して計算された、LEO-ISS (黒線) と GEO (赤線) 環境における積分粒子流量と入射 LET の関係を示しています。Y 軸は、高い LET から低い LET

まで積分された磁束を表しています。特定の LET 値における積分フラックスの値は、実際には、その特定の LET 値におけるすべてのイオン イベントをそれより高いすべての LET に積分したものです。

このデータを使用すると、任意の LET の積分粒子フラックスを抽出できます。イベント率の計算を簡素化するために、すべての断面積曲線が正方形であると仮定します。つまり、開始 LET 未満では断面積は完全にゼロですが、開始 LET を超えると断面積は飽和断面積と均一に等しくなります。図 1-2 は、緑の曲線が実際のワイブル曲線を、赤の破線で示した「正方形」近似データに当てはめている近似値を示しています。これにより、1 回の乗算でイベントレートを計算できます。イベントレートは、オンセット LET の積分フラックスと飽和断面積の積になります。明らかに、二乗近似の下で面積が実際の断面曲線よりも大きいため、イベントレートの過剰推定につながりますが、上限イベントレートの推定値を計算するために、この変更により、フラックス曲線と断面曲線上の積分を行う必要がなくなります。

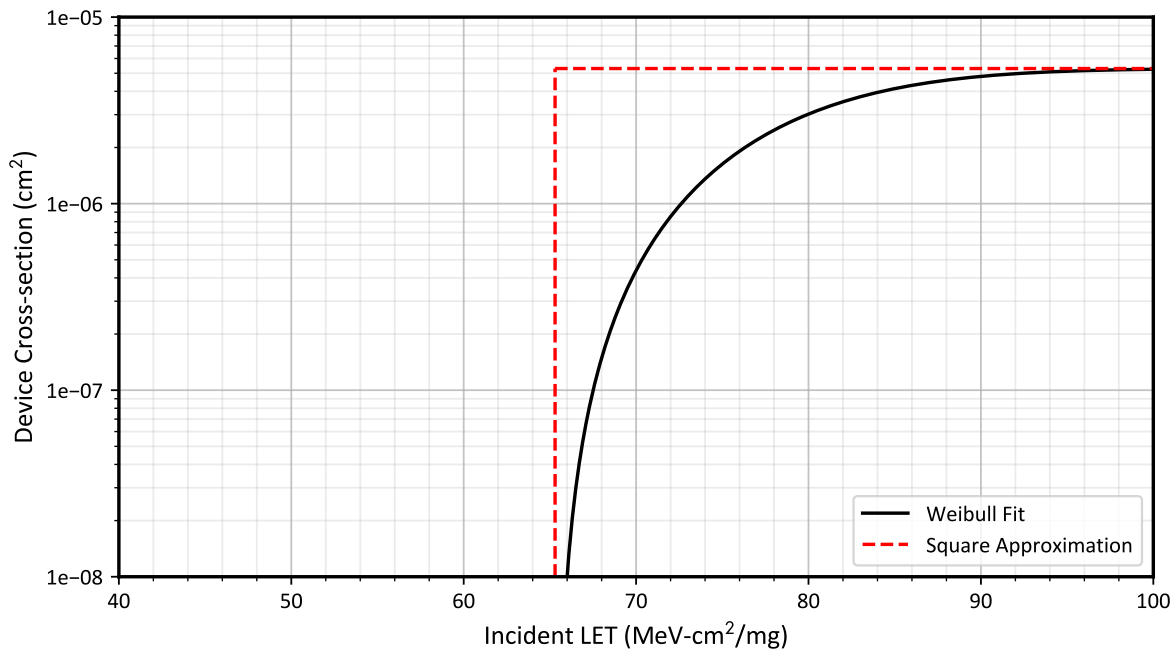


図 1-2. デバイスの断面と入射 LET の関係。ワイブル近似 (黒) が正方形近似 (赤破線) によってどのように「簡略化」されているかを示しています。

図 1-2 に、デバイスの断面図とインシデントレット LET の対比を示します。この図は、ワイブル フィット (黒) が正方形近似 (赤い破線) を使用して「簡略化」していることを示しています。

イベントレートの計算方法を 図 1-2 示すには、断面がに示されているデバイスの GEO 軌道のイベントレートを計算する必要があります。図 1-1 の赤い曲線と、図 1-2 から得られた開始入射 LET 値 (約 65MeV²/mg) を使用すると、GEO 積分フラックスは約 3.24×10^{-4} ions/cm² 日であることがわかります。イベントレートは、図 1-2 の積分磁束と飽和断面積の積 (約 5.3×10^{-6} cm²) です。

$$GEO \text{ Event Rate} = \left(3.24 \times 10^{-4} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2 \times \text{day}} \right) \times (5.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2) = 1.71 \times 10^{-9} \frac{\text{events}}{\text{day}} \quad (1)$$

$$GEO \text{ Event Rate} = 0.71 \times 10^{-10} \frac{\text{events}}{\text{hr}} = 0.071 \text{ FIT} \quad (2)$$

$$MTBF = 1,607,820 \text{ Years} \quad (3)$$

2 参考資料

1. Vanderbilt University, [Crème-MC](#), webpage.
2. A. J. Tylka, and others, "CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code", IEEE Trans. Nucl. Sci., 44(6), 1997, pp. 2150-2160.
3. A. J. Tylka, W. F. Dietrich, and P. R. Boberg, "Probability distributions of high-energy solar-heavy-ion fluxes from IMP-8: 1973-1996", IEEE Trans. on Nucl. Sci., 44(6), Dec. 1997, pp. 2140 – 2149.
4. A. J. Tylka, J. H. Adams, P. R. Boberg, and others, "CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code", Trans. on Nucl. Sci, 44(6), Dec. 1997, pp. 2150 – 2160.

3 改訂履歴

Changes from Revision A (November 2022) to Revision B (June 2025)	Page
---	------

- | | |
|--|---|
| • すべての計算がインシデントレット LET に関して決定されることを反映するようにテキストとグラフを更新..... | 2 |
| • Web サイト参照を更新..... | 4 |
-

Changes from Revision * (May 2020) to Revision A (November 2022)	Page
--	------

- | | |
|--------------------------------------|---|
| • ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新..... | 1 |
|--------------------------------------|---|
-

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated