

傷害予測数計算条件及び方法（人工衛星）

平成令和30-元年3*月30**日 改訂第1初版

内閣府宇宙開発戦略推進事務局

改訂履歴

版数	制定日	改訂内容
初版	平成 30 年 3 月 30 日	新規制定
<u>改訂第 1 版</u>	<u>令和元年*月**日</u>	<u>一部改訂</u>

目次

1. はじめに	2
2. 対象フェーズとガイドライン	2
3. 傷害予測数の基準値	2
4. 傷害予測数計算のプロセス	3
4.1. ハザード識別	3
4.2. 故障確率の設定	4
4.3. 破片モデルの検討	4
4.4. 落下確率 (P_i)	4
4.5. 傷害予測数 (E_c)	5
5. 超小型衛星の落下危険度	8
6. 解析ツール例	9

1. はじめに

本書は、リスク評価として実施する傷害予測数を計算するための条件及び方法の例を示すものである。

なお、根拠を示すことにより、本書記載以外の条件や方法によるリスク評価も許容される。

2. 対象フェーズとガイドライン

人工衛星の管理の期間中又は終了後に地球に落下する人工衛星又は人工衛星を構成する機器等にあっては、大気圏通過中に完全に溶融しない場合、傷害予測数による評価が求められる。

傷害予測数が国際基準以内であることを確認し、必要に応じて制御再突入を実施して地上へのリスクを低減する。

関係するガイドラインの項目は以下のとおりである。

- ・ 「人工衛星の管理に係る許可に関するガイドライン」
 - 6.2.4 項 再突入時の第三者損害防止
 - 6.4.1 項 地球への制御再突入

3. 傷害予測数の基準値

傷害予測数は、打上げ及び再突入において国際的に広く採用されているリスクを評価する指標の一つである。通常 *Ec* (Expected Casualties) と表し、単位は「人」である。

各国が規定する人工衛星再突入に係る傷害予測数を表 3-1 に示す。

表 3-1 傷害予測数（ E_c ）基準比較表

No.	組織	文書名	傷害予測数（ E_c ）
1	NASA	NASA-STD-8719.14A Process for Limiting Orbital Debris	<p><共通事項></p> <ul style="list-style-type: none"> 地球への再突入を行う人工衛星等が対象 衝突エネルギーが 15 J を上回る破片を考慮 <p><u>Uncontrolled Reentry</u></p> <ul style="list-style-type: none"> The risk of human casualty $< 1 \times 10^{-4}$ <p><u>Controlled Reentry</u></p> <ul style="list-style-type: none"> The risk of human casualty $< 1 \times 10^{-4}$
2	ESA	ESSB-HB-U-002 ESA Space Debris Mitigation Compliance Verification Guidelines	1×10^{-4}
3	CNES	French Space Operations Act Technical Regulation	<p>回収を伴う制御再突入：2×10^{-5}</p> <p>破壊を伴う制御再突入：2×10^{-5}</p> <p>自然落下※：1×10^{-4}</p> <p>※制御再突入の実行が不可能であると適切に証明される場合であって、講じうる最大限の措置を実行しなければならない。</p>

FMEA（Failure Modes and Effects Analysis）に基づく故障確率は、設計過誤やヒューマンエラーの確率を過小に見積もられる場合がある。推力低下や構造不良、外的要因による異常の発生確率も同様である。

適用する基準値に対し過小評価となっていないか、注意する必要がある。

4. 傷害予測数計算のプロセス

本章に典型的な傷害予測数の計算プロセスを示す。

なお、計算方法の詳細については下記資料も参考にできる。

FAA Flight Safety Analysis Handbook Version 1.0, September 2011

4.1. ハザード識別

地上への落下が発生し得る、故障を含む全モードを識別する。

人工衛星を制御再突入させる場合でも、人工衛星が大気圏突入して、十分に溶融せず、残存物が地上に落下して人命又は人体機能の長期低下若しくは喪失を与えるハザードがある。残存物には、潜在的には人工衛星の構成部材、残留推進薬、回収カプセルなどが考え得る。

制御再突入の場合は、異常発生により計画した着地予想区域外に落下して上記のハザードが顕在化する故障モードを識別すること。なお、ハザード識別にあたっては、制御再突入中のマヌーバ等の不具合により正常再突入ができない事象のみでなく、再突入機能の喪失

により制御再突入が実行できず、結果として自然落下に至る事象も考慮すること。

また、各モードにおいて地上へ落下した際に、損害を及ぼす可能性のあるハザード源（破片の衝突、爆風、有害ガス等）によるリスクを評価する必要がある。

液体推進薬や固体推進薬がそのまま地上に落下する形態においては、地表面衝突時の爆発の風圧や、推進薬が毒性を有する場合は健康被害のハザードがある。

4.2. 故障確率の設定

制御再突入の場合は、4.1項で識別したモードごとに発生確率を検討する。異なる故障の結果、地上への落下が似通った状態に帰結する場合はまとめてもよい。なお、再突入中のマヌーバ異常（再突入マヌーバ期間における信頼度の低下）に加え、再突入実施時点における必要な機能の故障等（再突入マヌーバ開始時点での再突入に必要な機能の信頼度）を考慮する必要がある。打上げや軌道投入から再突入実行まで時間を要する場合は、信頼度の低下に注意が必要である。

自然落下させる人工衛星の場合、故障確率は考慮不要で、地上への落下確率は1となる。

4.3. 破片モデルの検討

機体が分解して放出される各搭載機器や破片をモデル化し、最終的にどのような状態で地上へ落下し得るかを検討する（人工衛星を構成する機器等を計画的に分離する場合も含む。）。

制御再突入の場合、落下途中での空力破壊などを再突入中の故障モードや飛行フェーズに対応して検討する。

溶融解析を行う場合は、以下の点等を考慮すること。特に後述の 5.【評価方法】を参照されたい。

- － 再突入物体の物理特性（形状、寸法、質量、材質等）
特に高融点材料の材質を用いているものについては、留意すること。
- － 解析開始時点の軌道特性（高度、軌道傾斜角等）
- － 大気モデル

4.4. 落下確率 (P_i)

- ・ 自然落下の場合
軌道傾斜角範囲内のどこでも落下し得る前提にて検討することによい。簡単には一様

分布若しくは地球を軌道傾斜角範囲内で緯度帯に区切り、各緯度帯に対する軌道の通過時間に基づき落下確率を比例配分する方法がある。

・ 制御再突入の場合

4.1 項で識別した故障モードや飛行フェーズに対応して再突入開始点での機体の軌道、位置及び速度の初期状態を検討し、落下経路及び落下点を求める。これらには不確定性を考慮する必要がある。

不確定性の要因の例を以下に示す。

- 機体位置、速度の初期状態における不確定性要因
- 落下時における不確定性要因

不確定性も考慮した上で、地上に被害を及ぼし得る範囲を適切に見積もること。この際、落下範囲のばらつきを広めることにより、確率計算が非安全側とならないよう注意を要する。

なお、都市部に落下する等の最悪のリスクを考慮する場合は、詳細な落下点の検討は省略できる可能性がある。

また、再突入機能の喪失により制御再突入が実行できず、結果として自然落下に至るケースについては、前述の自然落下の場合の考慮方法を参照のこと。

4.5. 傷害予測数 (E_c)

最終的に地上に落下する破片を識別し、その投影面積を確認する。各計算地域に対する傷害予測数を下式により求める。各地域の落下確率に各破片の危険面積、個数、当該地域の人口密度を掛け合わせて得た傷害予測数を合計する。

$$E_{C-Total} = \sum_i \sum_j E_{Cij}$$

$$E_{Cij} = P_{Iij} \left(\frac{N_{Pj}}{A_{Pj}} \right) (N_{Fi} A_{Ci})$$

P_{Iij} : エリア j への落下物体 i の落下確率

A_{Ci} : 落下物体 i の危険面積

N_{Fi} : 落下物体 i の個数

N_{Pj} : エリア j の人口

A_{Pj} : エリア j の面積

出典 : FAA Flight Safety Analysis Handbook ver1.0, September 2011

(1) 考慮破片の除外

衝突や接触等により人命又は人体機能の長期低下若しくは喪失に関わる重大な被害を与える破片等の落下物を対象として傷害予測数を計算する。再突入時の破片の衝突ハザードについては、落下エネルギーの閾値として $15\text{J} (\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2)$ 以上の破片とする。それ以外の数値を使用する場合は、その根拠を示すこと。

落下エネルギーが閾値以下の破片は、計算から除外してよい。また、熔融効果を考慮する場合、落下途中に熔融すると判断できる破片は除外してよい。

(2) 危険面積

危険面積は破片が人に傷害を及ぼし得る範囲を面積で示したものである。

破片の衝突ハザードについては、破片が屋外にいる直立状態の人へ垂直に落下すると仮定し、人の地面への投影面積分を破片面積に考慮するのが一般的である。

危険面積の考慮方法の例を以下に示す。

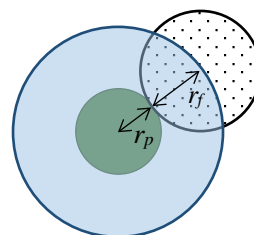
① 球体の場合

$$A_c = \pi(r_p + r_f)^2$$

A_c : 危険面積 (m^2)

r_p : 人の地表面投影半径 (m)

r_f : 破片半径 (m)



② 多角形の場合

$$A_c = A_f + (L_f \times r_p) + A_p$$

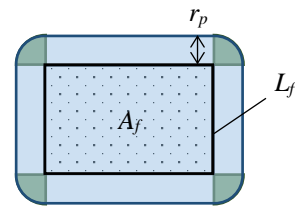
A_c : 危険面積 (m²)

A_f : 破片面積 (m²)

L_f : 破片周辺長 (m)

r_p : 人の地表面投影半径 (m)

A_p : 人の地表面投影面積 (m²) = $\pi \times r_p^2$



(参考 1) NASA のスペースデブリ発生防止に関する要求では、危険面積計算において人の地表面投影面積は 0.36 m²で近似している。

出典 : Process for Limiting Orbital Debris, NASA-STD-8719.14A, NASA, 8 December 2011

(参考 2) FAA は直立状態の人の典型的仮定として、高さ 6ft (1.829m)、半径 1ft (0.3048m) のシリンダー形状としている。

出典 : FAA Flight Safety Analysis Handbook Version 1.0, September 2011

ハザード源として二次爆発による爆風及び二次飛散や有害ガスも考える場合には、その影響範囲を下記の閾値に従って評価する。

- ・ 爆風圧 : ピーク過圧 6.9kPa (1.0psi) 以上
- ・ 有害ガスの濃度 : 対象物質ごとに国際標準又は各国宇宙機関等が定める基準の水準と同等のものとする。

なお、現状は前述のとおり破片の衝突時の危険面積については屋外直立状態の人への垂直落下時の面積考慮が一般的だが、風により流されて直立した人の側面に衝突する場合、人が横たわっている場合を考慮する海外宇宙機関もある。また、屋内におり、小破片を大幅に除外する一方、大破片による建屋の崩落を考慮する場合もある。

これらは国際間で議論が継続されているため今後変更の可能性があることに注意するとともに、運用する人工衛星の特性に応じた安全上適切な仮定を検討することが望ましい。

(3) 計算地域の設定と人口データ

世界の人口分布を得るためには、人口分布データ GPW (Gridded Population of the World) [2018 年 1 月現在 version-4] の使用が推奨される。

NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) :

<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>

本データは人口増加の予測機能もあり、また、維持更新されている。

制御再突入時の異常発生においては特定の地域に危害が及ぶ可能性が高いことから、より詳細なデータが必要となる。特に都市部については人口密度が不適切に薄まらないよう配慮が必要であり、人口調査（Census 等）のソースにより別途人口データを整備する必要がある。

5. 超小型衛星の落下危険度

超小型衛星については、極端な設計（多数のチタン製部品で構成されている、放射性物質や毒物を搭載している等）でない限り、落下危険度は小さいことから、詳細な検討を省略できる場合がある。以下を参考に簡易的な評価を行ってもよい。

【前提条件】

- ・ 1U, 2U, 3U 及び 50cm 級の一般的形状と質量の超小型衛星
- ・ 衛星構造体やパネルが高融点材料で製造又は耐熱コーティングされていないこと。

【評価方法】

- (1) 超小型衛星に使用する構成品の物理特性リストを作成する。
- (2) (1) で作成したリストにおいて、1 辺が 60cm 以下の構成品で表 5-1 に該当するものについては、完全熔融又は残存物の落下エネルギーが 15J 未満と判断し、評価対象から除外してよい。なお、ステンレス、チタン等の高融点材料に包含されている部材は、高融点部材として評価する。
- (3) 表 5-1 に該当しない構成品に対して、NASA DAS もしくは ESA DRAMA、ORIUNDO 等により、傷害予測数を評価する。

表 5-1 各軌道と各材質の詳細評価省略可能閾値

	<u>アルミ合金</u>	<u>ステンレス</u>	<u>チタン</u>	<u>銅</u>	<u>ニッケル</u>
<u>ISS 軌道からの再突入</u>	<u>評価省略可</u>	<u>0.2kg 以下</u>	<u>0.1kg 以下</u>	<u>評価省略可</u>	<u>0.2kg 以下</u>
<u>極軌道からの再突入</u>	<u>評価省略可</u>	<u>0.2kg 以下</u>	<u>0.2kg 以下</u>	<u>評価省略可</u>	<u>0.2kg 以下</u>

注 1: 1 辺が 60cm を超える構成品については、上表を適用できない。

注 2: エポキシ樹脂、ポリエチレン繊維等の非金属材は、評価を省略してよい。

注 3: CFRP を使用する場合は、実際の物性値に応じた評価を要する。なお、より安全側（溶けにくい材料）での評価に代えてもよい。

6. 解析ツール例

一般に公開されているリスク評価ツールの例を以下に示す。

なお、これらはリスク評価における事務局推奨ツールの位置付けではない。また、リスク評価は入力パラメータに大きく依存するため、事務局との相談を推奨する。

- ・ NASA

- DAS (Debris Assessment Software) :

デブリ評価支援ツール。一般に公開だが、NASA との Software Usage Agreement 締結が求められる。また、NASA Software Catalog のアカウント取得が必要である。

<<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/mitigation/das.html>>

- ・ ESA

デブリ評価支援ツール。一般に公開だが、ESA のアカウントを作成、ログインが求められる。

<<https://sdup.esoc.esa.int/web/csdtf/home>>

- MASTER (Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference)

- DRAMA (Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis)

- ORIUNDO (On-ground RISK estimation for UNcontrolleD re-entries tOol)

- ・ JAXA

- ORSAT-J (Object Re-entry Survival Analysis Tool - Japan) :

再突入溶融解析ツール。付属する Excel にて傷害予測数の計算も可能。人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律の申請が必要な日本国内の事業者等（大学、企業、国の機関等）のうち、総質量 100kg 以上の宇宙機又はロケットを開発する者向けに JAXA が貸与を実施している。利用申請書の提出が必要である。

<<http://sma.jaxa.jp/Software/ORSAT-J/index.html>>