

(人工衛星等の打上げに係る許可に関するガイドライン 別紙)

傷害予測数計算条件及び方法（ロケット）

令和元年9月14日 改訂第1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
改訂第 1 版	令和元年 9 月 14 日	一部改訂

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	4
4.1. ハザード識別	4
4.2. 故障確率の設定	4
4.3. 破片モデルの検討	5
4.4. 落下確率 (P_i)	5
4.5. 傷害予測数 (E_c)	6
5. 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

ロケットについて傷害予測数による評価が求められるのは以下2フェーズに分かれる。

(1) ロケット発射から飛行安全管理期間の終了まで

ロケット飛行に伴う地上へのリスクを国際基準以内に収めるため、適切な飛行経路を設定するとともに、ロケット設計において飛行中断を行う機能を搭載する。

(2) 再突入フェーズ

ロケット軌道投入段の地球への再突入に伴う地上へのリスクを国際基準以内に収めるため、必要に応じて地球への制御再突入を実施する。

関係するガイドラインの項目は以下のとおりである。

- ・ 「人工衛星等の打上げに係る許可に関するガイドライン」
 - 6.3.4.2 項 飛行経路
 - 6.3.14 項 飛行中断の実施
 - 6.3.17 項 ロケット軌道投入段の保護領域からの除去

- ・ 「人工衛星の打上げ用ロケットの型式認定に関するガイドライン」
 - 6.4 項 飛行中断機能

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 E_c (Expected Casualties) と表し、単位は「人」である。

各国が規定するロケット打上げ及び再突入に係る傷害予測数の比較を表 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	USAF	AIR FORCE INSTRUCTION 91-217 SPACE SAFETY AND MISHAP PREVENTION PROGRAM	(1) ロケット発射から軌道投入まで： 100×10^{-6} （ $=1 \times 10^{-4}$ ） ※以下に該当項目がある場合は考慮する ・分離物の落下 ・打上げ地点又は着地点への制御着地 (2) 再突入： 100×10^{-6} （ $=1 \times 10^{-4}$ ） ※主要なコンポーネントごと個別に評価してよい。 （例：軌道投入と搭載宇宙機等）
2	FAA	14CFR Part417、他 Commercial Space Transportation Regulations Licensing and Safety Requirements for Launch	<共通事項> ・衝突エネルギーが 15 J を上回る破片を考慮 (1) ロケット発射から軌道投入まで： 1×10^{-4} ※以下に該当項目がある場合は考慮する ・分離物の落下 ・打上げ地点又は着地点への制御着地 (2) 再突入： 1×10^{-4}
3	NASA	(1) NASA-STD-8719.25 Range Flight Safety Requirements (2) NASA-STD-8719.14A Process for Limiting Orbital Debris	(1) ロケット打上げフェーズ 100×10^{-6} （ $=1 \times 10^{-4}$ ） ※打上げ、再突入といった飛行フェーズ別の基準満足で可 (2) 帰還フェーズ ・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 <u>Uncontrolled Reentry</u> ・The risk of human casualty $< 1 \times 10^{-4}$ <u>Controlled Reentry</u> ・The risk of human casualty $< 1 \times 10^{-4}$
4	RCC (注)	RCC DOCUMENT STANDARD 321-16 COMMON RISK CRITERIA STANDARDS FOR NATIONAL TEST RANGES	100×10^{-6} （ $=1 \times 10^{-4}$ ）
5	ESA	ESSB-HB-U-002 ESA Space Debris Mitigation Compliance Verification Guidelines	1×10^{-4}
6	CNES	French Space Operations Act Technical Regulation	(1) ロケット打上げフェーズ 2×10^{-5} (2) 帰還フェーズ 制御再突入： 2×10^{-5} 自然落下※： 1×10^{-4} ※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、講じる最大限の措置を実行しなければならない。

(注) Range Command Council

なお、米国のロケット打上げに対する傷害予測数計算では、異常の発生確率に過去の打上げ機の実績を適用しており、基準値もその実績の中で確立されてきたものである。

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。

打上げ時はおもにより、ロケット軌道投入段を制御再突入させる場合でも、ロケット軌道投入段が大気圏突入して、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、潜在的にはロケットの構成部材、残留推進薬が考え得る。

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に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

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。

また、ロケット軌道投入段の再突入時は、トータル（計画どおりの制御落下を1つのモードとして含める）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。

指令破壊による破片化や機体の一体落下による燃料の二次爆発、落下途中での空力破壊などを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。

- ・ 再突入物体の物理特性（形状、寸法、質量、材質等）
- ・ 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)

- ・ 打上げの場合

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落下を開始する機体の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

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。

- ・ 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でよい。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。打上げ時及び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15J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$) 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、溶融効果を考慮する場合、落下途中に溶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。

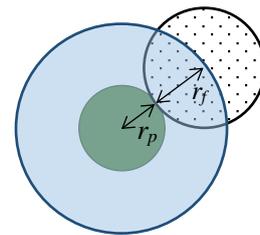
① 球体の場合

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

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

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

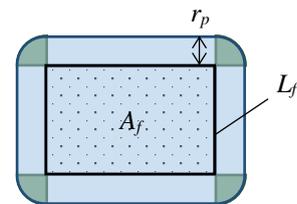
A_c : 危険面積 (m^2)

A_f : 破片面積 (m^2)

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 (m^2) = $\pi \times r_p^2$



(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 m^2 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、打ち上げるロケット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。

ロケット打上げや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. 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内閣府宇宙開発戦略推進事務局（以下「事務局」という。）の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。

- ・ JAXA
 - ALMA/MONACO :

経路計算及びモンテカルロシミュレーションなどによる上昇、落下予測解析を実施するツール。H-IIA/B ロケット及びイプシロンロケットにおける傷害予測数解析に使用。JAXA との利用許諾などの締結に伴い使用可能となる。
 - ORSAT-J

再突入溶融解析ツール。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、総重量 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>>

- ・ 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)
 - RIUNDO (On-ground RIsk estimation for UNcontrolleD re-entries t0ol)