限定なし

JERG-2-144

微小デブリ衝突耐性評価標準

平成 24 年 5 月 10 日　制定

宇宙航空研究開発機構

免責条項
ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer
The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部
JAXA（Japan Aerospace Exploration Agency）

目　次

1 適用範囲 1
2 関連文書 1
2.1 適用文書 1
2.2 参考文書 1
3 用語の定義及び略語 1
3.1 用語の定義 1
3.2 略語 2
4 前提条件 2
5 衝突耐性評価要領 2
5.1 基本要求 2
5.2 衝突耐性評価手順 2
5.3 宇宙機設計・運用パラメータの確認 3
5.3.1 運用パラメータ 3
5.3.2 宇宙機設計データ 3
5.4 デブリ等の衝突耐性への要求の設定 3
5.5 評価対象コンポーネントの抽出と不具合モードの特定 4
5.6 損傷限界の特定 4
5.7 衝突頻度解析 4
5.8 損傷率と非故障確率の算出 5
5.9 評価 5
5.9.1 非故障確率が大きい場合 5
5.9.2 非故障確率が小さい場合 5

1　適用範囲

本標準は「衛星及び探査機等」（以下「宇宙機」）について、衝突頻度及び衝突被害が無視できない 1mm 程度以下の微小なデブリ及びメテオロイド（以下「デブリ等」という）の衝突リスクに対し、防御設計の妥当性を確認するための評価要領を示すものである。

2　関連文書

2.1　適用文書

以下の文書は、本標準の定める範囲において、本標準の一部とする。

(1)　JMR-003 スペースデブリ発生防止標準

(2)　JERG-2-144-HB001：スペースデブリ防護設計マニュアル

2.2　参考文書

関連する参考文書を以下に示す。

(1)　IADC-04-03　Protection Manual　（2011 年 4 月）

3　用語の定義及び略語

3.1　用語の定義

以下の用語を定義する。

(1) 衝突条件：　衝突物の特性（質量、寸法、衝突速度、材料特性、衝突角度）及び被衝突物の特性

(2) 損傷限界：　有害な損傷を招く限界を、評価対象毎にデブリ等の直径で表したものである。

(3) 損傷率：　デブリの衝突で有害な損傷（本項(6)で定義）を受ける回数の単位時間当たりの期待値である。有害な損傷を与えるデブリの衝突頻度と衝突に脆弱な部分の冗長性などを考慮して求まるもので、衝突頻度が時間の関数になる場合はこれも時間の関数である。

(4) 弾道限界方程式：　損傷限界をデブリ等の直径で表現するための、いわば「衝撃破壊方程式」の意味で用いる。

(5) デブリ衝突耐性要求：　有害な損傷の発生率の許容最大値を定義したもので、PNF_{min}（最小非故障確率）で表す。

(6) 有害な損傷：　デブリ等の衝突により評価対象コンポネントの機能が維持できなくなる損傷である。有害な損傷となる損傷モードには、コンポーネントの特性に応じて貫通、所定のサイズ以上のクレータ、ケーブル被覆の損傷等などがあるので、評価対象コンポーネントの特性に応じて判断すること。（詳細は JERG-2-144-HB001 参照）

3.2　略語

(1) IADC：Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
(2) PNF：　Probability of Non Failure

4　前提条件

宇宙機を微小デブリ・メテオロイド環境に配慮してミッションを保証するためには、ミッション要求の定義の段階から開発の進展に応じて、システム設計を含めて以下が JAXA と調整されていることを前提とする。

(1) 運用軌道高度の決定におけるデブリ密度の考慮
(2) 宇宙機形状の決定の際のデブリ衝突確率分布の配慮
(3) 衝突リスクの許容度に関する方針の設定（ミッションの重要性、他の冗長系との関係等）
(4) 衝突防御策に伴う質量損失、コンポーネント配置の見直しの影響などシステム設計の観点からの評価（資源配分も含む）
(5) 衝突の検知、被害のモニタ、復帰・縮退・切り離し等を含むコンテンジェンシープランの設定。

本標準は、以上の配慮で決定された宇宙機の形状・寸法、運用軌道の特性、運用時期を前提として、衝突防御設計を行う際の指針となるものである。

5　衝突耐性評価要領

5.1　基本要求

宇宙機の設計フェーズにおいて、デブリ等の衝突が宇宙機の運用終了後の廃棄操作を成功裏に行うことを妨げるリスクへの対策の要否を決断するために、衝突耐性を評価しなければならない。ミッション機器の保護についてはプロジェクト毎の判断による。

5.2　衝突耐性評価手順

以下に評価の流れを示す。（付録の評価フロー図参照）

(1)　宇宙機設計・運用パラメータの準備

(2) デブリ等の衝突耐性への要求の設定
(3) 評価対象コンポーネントの抽出と不具合モードの特定
(4) 損傷限界の特定
(5) 衝突頻度解析
(6) 損傷率と非故障確率の算出
(7) 評価

5.3 宇宙機設計・運用パラメータの確認

デブリ等の衝突頻度は、宇宙機を運用する軌道高度及び軌道傾斜角度、運用時期、宇宙機の形状と評価対象コンポーネントの搭載条件で異なる。この項では解析条件としてこれらの情報を収集する。

5.3.1 運用パラメータ

宇宙機の軌道特性（高度、軌道傾斜角度）、進行方向に対する姿勢、運用時期などの宇宙機の運用パラメータを識別する。

5.3.2 宇宙機設計データ

宇宙機の構成モデルの作成に必要な形状・寸法等幾何学的情報、並びに損傷モードの判断に必要な設計データを準備する。

5.4 デブリ等の衝突耐性への要求の設定

デブリ衝突耐性要求として、デブリ等の衝突に対する宇宙機のシステム最小非故障確率(PNF_{min})を定義すること。

衝突耐性評価の基本は、システム最小非故障確率(PNF_{min})と解析で求めたシステム非故障確率（$PNF_{S/C}$）の関係が以下であることを確認することである。

$$PNF_{S/C} \geq PNF_{min}$$

ここで、基本的な非故障確率（PNF）は、損傷限界の被害をもたらすデブリ等の衝突頻度等から算出される損傷率 $p(t)$と運用期間（t）から以下の式で求めるものである。なお、この過程では信頼度計算の考え方と同様に冗長系等の配慮が加わる。

$$PNF = \exp\left[-\int_0^t p\ (t)dt\right]$$

運用期間中の損傷率を一定（λ）とした場合は、以下の式に簡略化される。

$$PNF = e^{-\lambda t}$$

5.5　評価対象コンポーネントの抽出と不具合モードの特定

デブリ等の衝突に対して有害な損傷を受ける可能性のある脆弱性を持つコンポーネントを評価対象として特定する。少なくとも廃棄操作に必須で脆弱性のあるコンポーネントを含めること。それらについて FMEA など信頼性解析技術を用いて有害な損傷を招く故障モードを特定する。

［参考：特定する故障モードは、例えば電力ケーブルについては短絡を招くケーブル被覆の破損であり、推進薬タンクについては破裂をもたらす貫通などであろう。詳細は宇宙機の設計思想で決定する。］

5.6　損傷限界の特定

5.5 項で特定した評価対象コンポーネントについて、設計情報（デブリ等の衝突方向に存在する筐体壁面、シールド材、衛星構造壁及びそれとの空隙等）を整理し、適切な既存の弾道限界方程式を特定し、デブリ等の衝突特性（デブリ等の材質、衝突速度、衝突角度等）を想定して、損傷限界の被害をもたらすデブリ等の直径を特定せよ。

適切な弾道限界方程式が得られなければ、既存の方程式を適用するか、超高速度衝突試験とシミュレーション解析を実施して新たな方程式を導くなどの処置についてJAXA と調整すること。

5.7　衝突頻度解析

5.3 項で整理した宇宙機設計情報から宇宙機の形状をモデル化する。更に、運用パラメータや運用時期から宇宙機各面に対する衝突頻度の概要を把握する。

この宇宙機システム全体への衝突頻度を更に詳細化して、個々の評価対象コンポーネント毎に損傷限界の直径のデブリ等の衝突頻度を計算すること。全運用期間中の衝突頻度は評価対象コンポーネントの衝突方向に対する投影面積を加味した単位期間当たりの衝突頻度を運用期間で積分したものとして計算される。

5.8　損傷率と非故障確率の算出

評価対象コンポーネントあるいはそれを含む系毎に、信頼度計算と同様の考え方で、衝突頻度に冗長系の存在などを考慮して求めた損傷率から運用期間中の非故障確率を算出する。

全ての評価対象コンポーネントについて非故障確率を算出し、それらを集計してシステム非故障確率（$PNF_{S/C}$）を求める。

5.9　評価

5.9.1　非故障確率が大きい場合

$PNF_{S/C} \geq PNF_{\min}$ ならば解析は終了する。

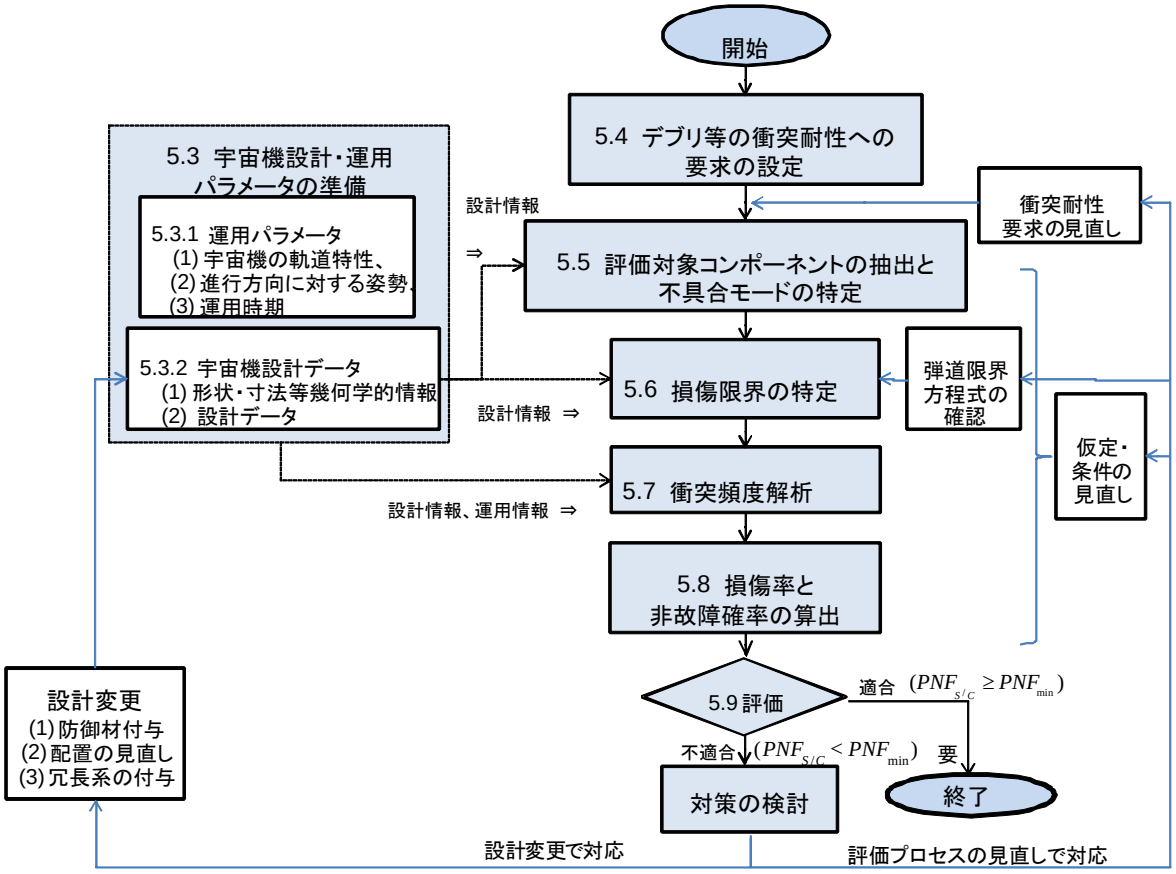
5.9.2　非故障確率が小さい場合

$PNF_{S/C} < PNF_{min}$ ならば、対処が必要と評価し、以下を含む適切な対策を講ずること。

(1) 評価プロセスに見直しの要素があれば見直す。
  a) 解析途中の種々の仮定や条件が適切であるか、要求が過剰ではないか再確認する。
  b) 使用した弾道限界方程式の不確定性が大きいことが原因であれば、衝突試験やシミュレーション解析によって評価精度を高めることについて JAXA と調整する。

(2) シールド材やバンパーの設置、コンポーネント配置の見直し、冗長系の付与等の対策を講ずる。

付録


開始
5.4 デブリ等の衝突耐性への要求の設定
5.3 宇宙機設計・運用パラメータの準備
5.3.1 運用パラメータ
(1) 宇宙機の軌道特性、
(2) 進行方向に対する姿勢、
(3) 運用時期
5.3.2 宇宙機設計データ
(1) 形状・寸法等幾何学的情報
(2) 設計データ
設計情報 ⇒
5.5 評価対象コンポーネントの抽出と不具合モードの特定
衝突耐性要求の見直し
5.6 損傷限界の特定
弾道限界方程式の確認
設計情報 ⇒
仮定・条件の見直し
5.7 衝突頻度解析
設計情報、運用情報 ⇒
5.8 損傷率と非故障確率の算出
5.9 評価
適合 $(PNF_{S/C} \geq PNF_{min})$
不適合 $(PNF_{S/C} < PNF_{min})$
要
対策の検討
終了
設計変更
(1) 防御材付与
(2) 配置の見直し
(3) 冗長系の付与
設計変更で対応
評価プロセスの見直しで対応

評価フロー図